



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

---

# **Detección temprana de daños mecánicos por golpe en el manejo poscosecha de la manzana Fuji a través de imágenes hiperespectrales**

**Oscar Leonardo García Navarrete**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C., Colombia

2013



# **Detección temprana de daños mecánicos por golpe en el manejo poscosecha de la manzana Fuji a través de imágenes hiperespectrales**

**Oscar Leonardo García Navarrete**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magíster en Ingeniería - Ingeniería Agrícola**

Director:

Ph.D. Javier Enrique Vélez Sánchez

Codirector:

Ph.D. José Blasco Ivárs

Línea de Investigación:

Poscosecha de Productos Agrícolas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C., Colombia

2013



*A mi hijo Oscar Felipe por ser mi fuente de  
inspiración y esfuerzo, a Nely, a mis padres,  
hermanos y demás familiares.*

*Hay una fuerza motriz más poderosa que el  
vapor, la electricidad y la energía atómica: la  
voluntad*

*Albert Einstein*



## Agradecimientos

Desde que emprendí el camino de realizar este magister han pasado muchas etapas de mi vida, una de las cuales fue mi estancia en el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias en el cual realice gran parte de este trabajo, y tuve un aprendizaje no solo profesional si no personal.

Agradezco a José Blasco, mi Codirector, jefe y gran compañero en mi estancia en el IVIA, a todos mis compañeros de laboratorio, Nuria, Sergio, Borja, Santi, los hermanos Alegre, Delia, Nayeli, y tantos que pasaron en el tiempo que estuve allí, que de una u otra forma aportaron a este trabajo. A Enrique Moltó que me permitió pertenecer al Centro y a todos los compañeros de AgroIngeniería.

Igualmente agradezco a José Manuel Prats, del Departamento de Estadística e Investigación Operativa de la Universitat Politècnica de València (España) por su apoyo en los análisis estadísticos.

Al profesor José Eugenio Hernández Hernández, que con su ayuda, planeación y grandes consejos fue posible culminar este trabajo, A mi director Javier Vélez, que con su dedicación y paciencia se ha forjado y terminado este gran proyecto.

Y por su puestos, a todos los míos que han aguantado más de cerca el gran esfuerzo y lejanía que hemos vivido, mil gracias por su apoyo que ha sido fundamental para alcanzar este objetivo.





## Resumen

Los daños mecánicos por golpe son uno de los principales problemas en la poscosecha de las manzanas, la detección temprana de estos, facilita la selección y evita los problemas de calidad durante el almacenamiento. El empleo de técnicas espectrales hace posible que se puedan detectar estos daños antes de que sean visibles. El objetivo de este estudio es identificar el golpe de manera temprana, con lo cual se buscó las longitudes de onda que detecten el daño lo más pronto posible, para esto se utilizó manzanas del cultivar 'Fuji' y se simuló el daño a través de un golpe controlado en dos tratamientos a diferentes temperaturas (4<sup>0</sup>C y 20<sup>0</sup>C) y se analizó la respuesta fisiológica durante siete días, al mismo tiempo se tomaron imágenes espectrales en la región comprendida entre 400 a 1700 nm con dos cámaras espectrales. Se encontró que la región del infrarrojo (1051,8 nm a 1096,6 nm) permite clasificar las zonas sanas y golpeadas a través de un análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA). Se desarrollaron aplicaciones para la toma y corrección de las imágenes espectrales y se estudió la evolución del daño, la cual no es significativa para la clasificación (sana y golpeada) con lo que se puede identificar el golpe desde el primer momento en los dos tratamientos. Los resultados de los parámetros fisiológicos (firmeza, acidez, sólidos solubles totales, CO<sub>2</sub> y etileno), se compararon con valores máximos y mínimos de reflectancia de las longitudes de onda seleccionadas, con lo que se encontró que según el tratamiento se tiene una relación directa o inversa.

Palabras clave: imágenes hiperespectrales, PLS-DA, visión artificial, NIR, espectrometría, manzana, daño por golpe.



## Abstract

The mechanical bruise by impact are one of the principal problems in the post-harvest's apples, the early detection of these, was facilitates the selection and avoids the problems of loss of quality during storage. The use of techniques as artificial vision and spectrometry make possible that this bruises can be detected before they become visible. The objective of this study is to identify hit at an early stage, thereby was search wavelengths that detect the bruises as soon as possible, for this we used apple's cultivar 'Fuji' and was simulated the bruise through a controlled impact in two treatments at different temperatures (4<sup>0</sup>C and 20<sup>0</sup>C) and was analyzed physiological response for seven days while were taken spectral images from 400 to 1700 nm with two spectral cameras. We found that the infrared region NIR (1051.8 nm to 1096.6 nm) can classify healthy zones and beaten through partial least squares discriminant analysis (PLS-DA). Were developed applications to capture and to correct the spectral images and was studied the evolution of bruise which is not significant for the classification (sound and bruised) so that you can identify the bruise from the first moment in the two treatments. The results of the physiological parameters (firmness, acidity, soluble solids total, CO<sub>2</sub> and ethylene) were compared with maximum and minimum values reflectance of selected wavelengths, thereby was found that according to the treatment has a direct or inverse relationship.

Keywords: mechanical bruise, PLS-DA, post-harvest, NIR, spectrometry, apple damage per hit.



# Contenido

<b>Resumen</b>	Pág. IX
<b>Lista de figuras</b>	XVII
<b>Lista de tablas</b>	XX
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>2. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	5
<b>3. MARCO TEÓRICO</b>	7
<b>3.1. Fisiología poscosecha de productos agrícolas</b>	7
3.1.1. Respiración de productos agrícolas	7
3.1.2. Clases de respiración	8
3.1.3. Proceso de la respiración	9
3.1.4. Intensidad respiratoria	10
3.1.5. Cociente respiratorio	11
3.1.6. Cociente de temperatura de respiración	12
3.1.7. Calor de respiración	13
<b>3.2. La cosecha de productos agrícolas</b>	14
3.2.1. Índices de cosecha	15
3.2.2. La madurez	16
3.2.2.1. Frutos Climáticos	17
3.2.2.2. Frutos No Climáticos	17
3.2.3. El proceso de la maduración	18
3.2.3.1. Cambios durante la maduración	18
<b>3.3. Daños mecánicos en poscosecha</b>	20
3.3.1. Origen de los daños	20
3.3.2. Consecuencias de los daños mecánicos	22
<b>3.4. Manejo poscosecha de la manzana</b>	23
3.4.1. Índices de cosecha de la manzana	23
3.4.1.1. Índices no destructivos	23
3.4.1.2. Índices destructivos	25
3.4.2. Recolección de la manzana	26
3.4.3. Operaciones de acondicionamiento para la manzana	28
3.4.4. Almacenamiento y conservación de manzana	29

<b>3.5. Visión artificial en la poscosecha de las frutas</b>	33
3.5.1. Aplicación de la visión por computador en los procesos de la agricultura	34
3.5.2. Sistemas de visión artificial convencionales e hiperespectrales	36
3.5.3. Aplicaciones de los sistemas de visión artificial convencionales e hiperespectrales en productos agrícolas	36
3.5.4. Tratamiento estadístico en imágenes hiperespectrales	39
3.5.4.1. Análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales	40
3.5.4.2. Corrección multiplicativa de la dispersión (MSC)	41
3.5.4.3. Aplicaciones del tratamiento estadístico en imágenes hiperespectrales de manzanas	41
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	45
<b>4.1. Comportamiento fisiológico poscosecha de manzanas estresadas por daño mecánico para los tratamientos A y B</b>	45
<b>4.2. Diseño Experimental</b>	45
<b>4.3. Preparación de las muestras</b>	46
<b>4.4. Ensayos destructivos</b>	46
4.4.1. Firmeza	46
4.4.2. Sólidos solubles totales	47
4.4.3. Acidez titulable	48
4.4.4. Intensidad respiratoria	49
<b>4.5. Adquisición de imágenes hiperespectrales para la detección temprana de daños mecánicos</b>	49
4.5.1. Equipos para la toma de imágenes hiperespectrales	50
<b>4.6. Longitudes de onda para la detección del daño en manzana</b>	51
4.6.1. Procesamiento de las imágenes hiperespectrales	51
4.6.2. Selección de bandas y creación del conjunto de etiquetado	52
4.6.3. Reducción de la dimensionalidad de los datos	53
<b>4.7. Relación de las imágenes hiperespectrales con los parámetros fisiológicos poscosecha</b>	53
<b>4.8. Análisis estadístico</b>	54
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	55
<b>5.1. Análisis de los momentos donde ocurre daño mecánico por golpe durante la vida poscosecha de la manzana ‘Fuji’</b>	55

<b>5.2. Comportamiento fisiológico poscosecha de manzanas estresadas por daño mecánico</b>	56
5.2.1. Firmeza	56
5.2.1.1. Firmeza medida con el texturómetro Instron Universal	56
5.2.1.2. Firmeza medida con el durómetro Durofel	58
5.2.2. Acidez titulable	60
5.2.3. Sólidos solubles totales	63
5.2.4. Ensayos de respiración, dióxido de carbono y etileno	65
5.2.4.1. Evolución del porcentaje de dióxido de carbono	65
5.2.4.2. Evolución del etileno	66
<b>5.3. Adquisición de imágenes Hiperespectrales para la detección temprana de daños mecánicos</b>	67
<b>5.4. Análisis de las imágenes hiperespectrales</b>	68
5.4.1. Corrección por referencia blanca	68
5.4.2. Creación del conjunto etiquetado de datos	68
5.4.3. Selección del rango espectral	70
5.4.3.1. Reducción de la dimensionalidad de los datos para el experimento de 6 horas continuas	71
5.4.3.2. Clasificación de los datos en grupos mutuamente excluyentes para el experimento de 6 horas continuas	75
5.4.3.3. Reducción de la dimensionalidad de los datos para los tratamientos A y B	77
5.4.3.4. Clasificación de los datos en grupos mutuamente excluyentes para los tratamientos A y B	81
<b>5.5. Relación de las imágenes Hiperespectrales con los parámetros fisiológicos poscosecha.</b>	82
<b>6. CONCLUSIONES</b>	91
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	95
<b>ANEXOS</b>	
A. Determinación de la fuerza de impacto	105
B. Proceso de recolección y transporte de la manzana Fuji	109
C. Descripción del software Fruitspectro	113
D. Descripción de la aplicación BWcorrection	119
E. Descripción del programa Etiquetador Espectral	121
F. Características edafo-climáticas de la zona de Osso de Cinca	123





## Lista de figuras

		Pág.
Figura 1-1	Producción de Manzana de los principales países de la UE27.	1
Figura 3-1	Cambios por la respiración y el crecimiento durante el desarrollo de la fruta.	18
Figura 3-2	Cartas de color para la variedad ‘Golden delicious’.	24
Figura 3-3	Cambio en el color de fondo.	25
Figura 4-1	Texturómetro Instron Universal Testing.	47
Figura 4-2	Medidor de firmeza Durofel Modelo DFT 100 Digital Firmness Tester.	47
Figura 4-3	Refractómetro digital Atago Modelo PR-32α; Atago.	48
Figura 4-4	Equipo para la determinación de acidez titulable.	48
Figura 4-5	Cromatógrafo de gases Modelo Trace; Thermo Fisher Scientific.	49
Figura 4-6	Estructura para la cámara hiperspectral NIR Modelo Xenics XEVA.	50
Figura 4-7	Estructura para la cámara hiperspectral Monocromática CoolSnap ES y filtros LCTF.	51
Figura 5-1	Esquema de los momentos en que pueden ocurrir daños mecánicos de la manzana ‘Fuji’.	55
Figura 5-2	Evolución de la firmeza medida con texturometro Instron para el tratamiento A.	56
Figura 5-3	Evolución de la firmeza medida con texturometro Instron para el tratamiento B.	57
Figura 5-4	Diagrama de Caja para la firmeza medido con Instron para los dos tratamientos.	58

Figura 5-5	Evolución de la firmeza de la zona con golpe medida con el durómetro Durofel para los dos tratamientos	59
Figura 5-6	Diagrama de caja para la firmeza medido con el durómetro Durofel para los dos tratamientos.	60
Figura 5-7	Evolución de la acidez en porcentaje de ácido málico, para el tratamiento A.	60
Figura 5-8	Evolución de la acidez en porcentaje de ácido málico, para el tratamiento B.	61
Figura 5-9	Muestras de manzana 'Fuji' de la zona del golpe para los ensayos de acidez y sólidos solubles totales.	62
Figura 5-10	Evolución de la acidez en porcentaje de ácido málico para los dos tratamientos.	62
Figura 5-11	Evolución de los sólidos solubles totales (SST), para el tratamiento A.	63
Figura 5-12	Evolución de los sólidos solubles totales (SST), para el tratamiento B.	64
Figura 5-13	Diagrama de Caja de los sólidos solubles totales (SST), para los dos tratamientos.	64
Figura 5-14	Evolución del CO <sub>2</sub> para los dos tratamientos.	65
Figura 5-15	Evolución del Etileno (μL/kg.h) para los dos tratamientos.	66
Figura 5-16	Esquema de las funciones del software Fruitspectro.	69
Figura 5-17	Proceso de etiquetado de una manzana, zona con golpe en rojo, y la zona sana en verde.	70
Figura 5-18	Gráfico de distancias al modelo ModX [4 Componentes] (PLS-DA), Cámara Xenics para el experimento de seis horas.	72
Figura 5-19	PLS-DA <i>Score Plot</i> , componente 1 frente a 2 para la cámara Xenics Colored according to clases.	73
Figura 5-20	PLS-DA <i>Score Plot</i> , componente 3 frente a 4 para la cámara Xenics Colored according to clases.	73
Figura 5-21	Longitudes de onda con mayor poder de discriminación para experimento de 6 horas continuas.	74
Figura 5-22	Gráfico w*c para la primera variable latente o componente 1 en el experimento de las seis horas - componente 1, cámara Xenics.	75

Figura 5-23	Diferencias promedio entre los espectros de las zonas sana y golpeada.	76
Figura 5-24	Gráfico de distancias al modelo ModX [1 Componente] (PLS-DA), Cámara Xenics para el tratamiento A.	77
Figura 5-25	Gráfico de distancias al modelo ModX [2 Componentes] (PLS-DA), Cámara Xenics para el tratamiento B.	78
Figura 5-26	Gráfico $w^*c$ para la primera variable latente o componente 1 para el Tratamiento A (PLS-DA), cámara Xenics.	79
Figura 5-27	PLS-DA <i>Score Plot</i> , componente 1 frente a 2 para el Tratamiento B, cámara Xenics Colored according to clases.	79
Figura 5-28	Importancia de la variable para la proyección (VIP) para las longitudes de onda con mayor poder de discriminación tratamientos A.	80
Figura 5-29	Importancia de la variable para la proyección (VIP) para las longitudes de onda con mayor poder de discriminación tratamientos B.	80
Figura 5-30	Longitudes de onda con mayor poder de discriminación	82
Figura 5-31	Evolución de las zonas sanas y con golpe del tratamiento A de las bandas del ranking.	86
Figura 5-32	Evolución de las zonas sanas y con golpe del tratamiento B de las bandas del ranking.	86
Figura 5-33	Evolución de la longitud de onda promedio de las zonas sanas y con golpe del tratamiento A.	87
Figura 5-34	Evolución de la longitud de onda promedio de las zonas sanas y con golpe del tratamiento B.	87
Figura A-1	Variables a considerar en el péndulo.	107
Figura B-1	Recolección manual en bolsas tipo canguro (picking bag).	109
Figura B-2	Recolección manual en baldes plásticos.	109
Figura B-3	Transporte de manzanas	111
Figura B-4	Rodillos de transporte de manzanas en la central de acopio.	112

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1	Susceptibilidad de las frutas a diversos tipos de lesiones mecánicas: susceptible (S); resistente (R); intermedio (I).
Tabla 3-2	Valores más recomendables para la temperatura de conservación de las manzanas.
Tabla 3-3	Valores más recomendables para la conservación de las manzanas en atmosfera controlada.
Tabla 5-1	Valor predictivo para cada rango espectral.
Tabla 5-2	Resultado del análisis de la varianza para los factores tiempo y clase.
Tabla 5-3	Matriz de confusión para el experimento de 6 horas continuas.
Tabla 5-4	Matriz de confusión para el tratamiento A
Tabla 5-5	Matriz de confusión para el tratamiento B
Tabla 5-6	Medias de cada día para los diferentes ensayos de respuesta al golpe del tratamiento A
Tabla 5-7	Medias de cada día para los diferentes ensayos de respuesta al golpe del tratamiento B.

# 1. INTRODUCCIÓN

El cultivo del manzano por su fácil adaptación a las diferentes condiciones climáticas, a los diversos tipos de suelos y sistemas de producción, se cultiva extensamente en Europa, Norte y Sur América, Nueva Zelanda, Australia y Asia.

Actualmente la producción de manzana en España ocupa, por su volumen de producción, el quinto lugar en la Comunidad Europea UE27<sup>1</sup>, situándose detrás de Italia, Polonia, Francia y Alemania, (FAO, 2010). En la Figura 1-1 se observa los principales países productores de la unión europea UE27.

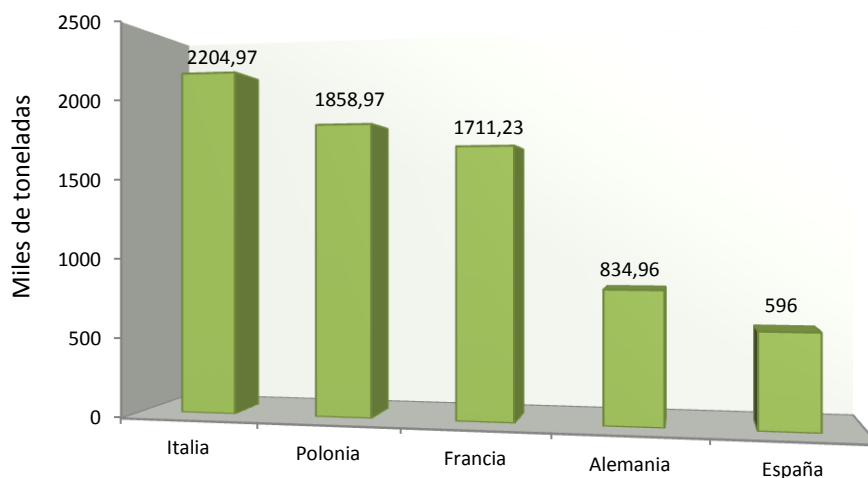


Figura 1-1. Producción de Manzana de los principales países de la UE27, Fuente FAO, (2010).

Sin embargo, la gran oferta que presenta el mercado mundial de frutas, especialmente de manzana, la competencia de terceros países con menores

<sup>1</sup> EU27: Unión Europea (UE) integrada a partir del 2007 por 27 países miembros.

costos de producción (mano de obra más barata), junto con la grave crisis de precios en que el sector frutícola español lleva inmerso varios años, impiden recuperar las elevadas inversiones y los gastos de mantenimiento de los cultivos, haciendo más difícil mantener la competitividad en un mercado cada vez más globalizado.

Las alternativas para mantener la rentabilidad del sector frutícola van desde la reducción de los costos de producción y acondicionamiento, así como también el aseguramiento de una excelente calidad del producto para obtener mejores ganancias. Estos dos objetivos pueden conseguirse con una adecuada automatización de los procesos que intervienen a lo largo del proceso productivo. Esta tesis se ha realizado en colaboración con el Centro de AgroIngeniería del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), situado en Valencia (España) y se enmarca en la línea de investigación de este grupo sobre la automatización y el desarrollo de nuevas tecnologías para la inspección de la calidad de la fruta mediante técnicas de visión por computador.

En la actualidad, la inspección de la calidad de algunas frutas se realiza de forma manual, empleando operarios entrenados que se sitúan en mesas de selección e inspeccionan toda la producción de fruta una a una. Sin embargo, la ausencia de criterios objetivos a la hora de determinar la calidad de una fruta o el cansancio que conlleva una tarea repetitiva influyen negativamente en la homogeneidad de esta selección y control de calidad.

Por otra parte, durante los procesos inmediatamente anteriores a esta selección de la fruta se producen algunas alteraciones de la calidad, generalmente debidas a lesiones por impacto provocadas durante la manipulación. Estas lesiones mecánicas suelen ser de cuatro tipos: cortes, impactos, compresiones y vibraciones, siendo las tres últimas difíciles de detectar por observación visual en algunos casos. Las lesiones por impacto se producen por la aplicación brusca o excesiva de una fuerza sobre las frutas y hortalizas, por ejemplo, si se dejan caer

los envases, o a consecuencia de los choques que puedan tener lugar durante el transporte de los productos.

Estos daños representan uno de los defectos de calidad más frecuentes en manzanas. Este tipo de daño se hace perceptible algunos días después de ocurrido el golpe, manifestado en cambios físicos en la textura del tejido y, eventualmente, en alteraciones químicas de la zona impactada, representadas en cambio en color y sabor (Del Río et al., 2000). Por otra parte, las vibraciones comunes durante el transporte generan abrasiones que varían en intensidad desde simples señales de frotamiento hasta la pérdida no solo de trozos de piel sino incluso de la porción carnosa de la fruta (Freifeld, 2005).

Los daños mecánicos no solo presentan un problema de apariencia externa y pérdida de calidad de los frutos sino que también originan alteraciones internas que influyen en el comportamiento fisiológico de estos, principalmente durante el almacenamiento. Según Segatori et al. (2005), el golpe provoca un importante incremento en la intensidad respiratoria y la producción de etileno (entre 3 y 20 veces después de 24 horas de producido el golpe), que condiciona la conservación y reduce la vida en mostrador hasta en un 50%.

Kays (1991) muestra como la evolución del golpe en la manzana llega hasta la pudrición de la zona afectada, además de aumentar la susceptibilidad a ser atacadas por microorganismos que implican desordenes fisiológicos, que a su vez pueden afectar la respiración (Vines et al., 1965; Woodward y Topping, 1972; El-Kazzaz et al., 1983) y por ende, su vida poscosecha.

La separación manual de las frutas con daño (selección), que hacen las cooperativas o empresas comercializadoras en el área de poscosecha no es eficiente. Estudios realizados por Ruiz-Altisent, (2000) muestran que el 37% de las manzanas que llegan a los minoristas en la ciudad de Madrid presentan magulladuras y el 41% presentan otros defectos.

Por tal razón, se hace necesario buscar herramientas y alternativas para identificar los daños mecánicos en las manzanas antes de que lleguen al consumidor, ya que la fruta pierde valor comercial y en ocasiones hay pérdida total del producto.

Para obtener un producto de excelente calidad, es importante detectar y separar las frutas que no cumplan con los estándares de calidad comercial, con lo cual se rechaza aquellas que presenten daños o defectos visibles o aquellas que no tengan el tamaño mínimo establecido.

Como se ha comentado, la clasificación de las frutas se hace generalmente de manera manual, aunque en ocasiones dependiendo del tamaño de la empresa comercializadora, se usan sistemas de visión artificial para clasificar las manzanas por tamaño y calibre, estos sistemas de clasificación son incapaces de detectar los daños, especialmente aquellos que todavía no son evidentes por no manifestar señales externas, pero que van a evolucionar en las próximas horas o días.

Precisamente, el desarrollo de nuevas tecnologías de adquisición y análisis de imagen hace posible que se puedan detectar estos daños antes de que sean visibles por el ojo humano. Una de estas tecnologías es la imagen hiperespectral. El avance de la tecnología espectral y su progresiva reducción de costos ha puesto al alcance del sector de la industria agrícola una herramienta muy potente con la que se pueden desarrollar sistemas que permiten desde determinar la calidad interna de la fruta hasta la posibilidad de detectar de forma temprana daños invisibles.

El empleo de estas técnicas de adquisición y de análisis de imagen, asociados a los parámetros fisiológicos de las frutas que se obtienen durante la vida poscosecha, son una herramienta muy útil para detectar la presencia de daños y reducir los costos en la manipulación de fruta que no cumple con las calidades que nos exige el consumidor.



## **2. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

### **Objetivo General**

Detectar los daños mecánicos en manzanas 'Fuji' producidos por golpes antes de que sean perceptibles a simple vista utilizando imágenes hiperspectrales y relacionarlos con los resultados obtenidos en el estudio del comportamiento fisiológico poscosecha.

### **Objetivos Específicos**

1. Analizar los posibles momentos donde ocurre daño mecánico por golpe durante la vida poscosecha de la manzana Fuji.
2. Obtener los parámetros fisiológicos poscosecha de las manzanas estresadas por daño mecánico a dos temperaturas de almacenamiento (tratamientos A y B).
3. Detectar el daño mecánico de las manzanas a través de las imágenes hiperspectrales. Estudiar la evolución temporal del daño y determinar el momento a partir del cual la detección es posible.
4. Identificar las longitudes de onda más significativas a través de técnicas estadísticas de selección y clasificación de características.
5. Relacionar los resultados obtenidos de la técnica de análisis espectral con los obtenidos en la evolución del comportamiento fisiológico en almacenamiento de la manzana 'Fuji' en dos ambientes.



## **3. MARCO TEÓRICO**

### **3.1. FISIOLÓGÍA POSCOSECHA DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS**

En la fisiología poscosecha se estudian los procesos, cambios o comportamientos que presentan los productos hortofrutícolas después de ser cosechados o retirados de la planta. A pesar de la separación de su fuente natural de agua y de nutrientes minerales y orgánicos, estos continúan viviendo hasta llegar al envejecimiento y muerte de los tejidos que los componen. El análisis de los factores relacionados con la vida de los productos hortofrutícolas en las etapas posteriores a la cosecha y su actuación sobre ellos, ayudan al aumento de la vida útil del producto y a conservar su calidad.

#### **3.1.1. Respiración de productos agrícolas**

La respiración es un proceso metabólico fundamental tanto en el vegetal vivo como en el producto recolectado (Wills et al., 1984). Todos los seres vivos precisan de un suministro continuo de energía que permite llevar a cabo las reacciones metabólicas precisas para el mantenimiento de la organización celular, el transporte de metabolitos y el mantenimiento de la permeabilidad de la membrana (Freifeld, 2005).

Las frutas y hortalizas una vez han sido cosechadas, continúan respirando, transpirando, metabolizando y por lo tanto experimentando cambios físico-químicos, a velocidades que dependen de cada producto y de las condiciones ambientales y del manejo a que están sometidas en la poscosecha (Parra y Hernández, 2005). La respiración es, básicamente, una operación inversa a la fotosíntesis, en la que la energía luminosa procedente del sol se almacena en

forma de energía química, principalmente en carbohidratos constituidos por unidades de glucosa. La vida útil de los frutos en general, depende de numerosos factores tanto biológicos (procesos naturales de respiración, producción de etileno y transpiración) como ambientales, (principalmente, la temperatura, la humedad y las concentraciones de gases en el ambiente) (Wills et al., 1984).

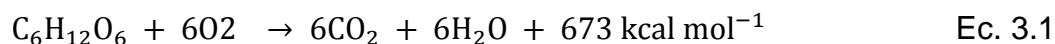
Tras su recolección, los frutos presentan una serie de problemas derivados de la falta de aporte de agua y nutrientes desde la planta (Freifeld, 2005). Quedan entonces a expensas de su propio metabolismo y esto da lugar a una pérdida gradual de calidad de la fruta en sus características organolépticas: textura, sabor y aroma, a medida que avanza su estado de senescencia y determina finalmente su muerte fisiológica (Cuquerella, 1990).

### **3.1.2. Clases de respiración**

La respiración se clasifica en dos tipos:

#### **➤ Respiración aeróbica**

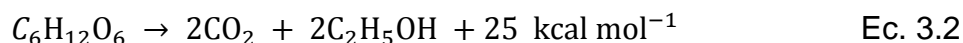
Se conoce como respiración aeróbica o respiración oxidación. Esta utiliza el oxígeno presente del aire para realizar su proceso oxidativo, que consiste en la oxidación de las reservas orgánicas a otras moléculas más simples, formando CO<sub>2</sub>, agua y energía. Su reacción general se expresa en la Ecuación 3.1:



Esta forma de respiración se considera un tipo de metabolismo energético, en el que los seres vivos extraen energía de moléculas orgánicas como la glucosa, por medio de un proceso complejo donde el carbono queda oxidado y en el que el aire es el oxidante empleado.

### ➤ **Respiración anaeróbica o fermentación**

Este tipo respiración se efectúa en ambientes de baja concentración o incluso en ausencia de oxígeno. Se genera menos energía que en la respiración aeróbica, produciendo alcohol y otras sustancias como productos finales cuya acumulación es tóxica para las células, llegando a causarles la muerte (Parra y Hernández, 2005). La reacción química se muestra en la ecuación 3.2.



Esta forma de respiración se reconoce como un proceso biológico de óxido-reducción de azúcares y otros compuestos y lo realizan exclusivamente algunos grupos de bacterias.

#### **3.1.3. Proceso de la respiración**

La respiración es el proceso metabólico de obtención de energía por parte del tejido vivo, a partir de la glucosa obtenida en la fotosíntesis. Esta energía producida es utilizada para realizar todos los procesos de la actividad celular. En el proceso global es una oxidorreducción en la que algunos compuestos se oxidan a  $CO_2$  y el  $O_2$  absorbido durante el proceso se reduce para formar  $H_2O$  (Salisbury y Ross, 1994). El sustrato oxidado durante la respiración es la glucosa, si la oxidación es completa se hace en presencia de  $O_2$  es decir respiración aeróbica, y si es incompleta se hace en ausencia del  $O_2$  es decir respiración anaeróbica. En los dos tipos de respiración se genera un desprendimiento de energía (Pantastico, 1979). En Parra y Hernández (2005), se resume el proceso de la respiración que consta de tres fases:

- ✓ Descomposición de polisacáridos (carbohidratos) en azúcares simples (aminoácidos).
- ✓ Oxidación de azúcares para la formación de ácido pirúvico.
- ✓ Transformación aeróbica de piruvato y de otros ácidos orgánicos en  $CO_2$ , agua y energía.

Igualmente, Longoria (2006) resume los procesos que se llevan a cabo durante la respiración:

- ✓ Glicólisis
- ✓ Ciclo de Kreb's /Ácidos Tricarboxílicos/ácido cítrico
- ✓ Sistema de transporte de electrones
- ✓ Ruta de la pentosa fosfato

En Parra y Hernández (2005) se complementa lo anterior mostrando que la respiración es el proceso de oxidación completa de la glucosa, la cual proviene de la hidrólisis de moléculas más complejas (polisacáridos) que constituyen la reserva del producto (almidón y sacarosa en particular). Su degradación conduce a la formación de CO<sub>2</sub>, agua, y energía mediante una serie de mecanismos localizados en el citoplasma (glicólisis) o dentro de las mitocondrias (Ciclo de Kreb's y cambios de oxidación respiratoria).

Durante el proceso de la respiración no toda la energía se aprovecha para las necesidades biológicas del tejido; la energía sobrante se elimina del proceso en forma de calor, con lo que se genera un aumento de temperatura en los tejidos. Este calor es necesario retirarlo para garantizar la conservación de la calidad del producto agrícola por lo que se hace necesaria la refrigeración del producto.

#### **3.1.4. Intensidad respiratoria**

Se define intensidad respiratoria o tasa respiratoria (TR) de un fruto como la cantidad de anhídrido carbónico emitido (CO<sub>2</sub>) o de oxígeno (O<sub>2</sub>) consumido por unidad de peso de fruta y unidad de tiempo (Freifeld, 2005). Son muchos los factores externos que determinan la TR como por ejemplo la propia recolección, así como la manipulación o la temperatura de conservación (Parker et al., 1984).

Las posibilidades de conservación de un determinado fruto tras su recolección están en relación inversa con su actividad metabólica. Por ello, la TR se considera

con frecuencia un índice de su vida potencial de almacenamiento (Freifeld, 2005). La TR se expresa como la cantidad de CO<sub>2</sub> producida en el proceso respiratorio por unidad de peso de producto fresco y por unidad de tiempo (Ecuación 3.3).

$$TR = \frac{Ca}{p \times t} \quad \text{Ec. 3.3}$$

donde,

- Cp: Cantidad de CO<sub>2</sub> producida por unidad de peso mg CO<sub>2</sub>.
- p: Peso del producto en kg.
- t: tiempo en horas.

### 3.1.5. Cociente respiratorio

El cociente respiratorio (CR), se define como la relación entre el CO<sub>2</sub> producido y el O<sub>2</sub> consumido y se representa en la ecuación 3.4. En el proceso de la respiración, si la oxidación de sustratos se realiza completamente, el volumen de O<sub>2</sub> asimilado se equilibra exactamente con el volumen de CO<sub>2</sub> liberado (Salisbury y Ross, 1994).

$$CR = \frac{\text{Volumen de CO}_2}{\text{Volumen de O}_2} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Parra y Hernández (2005), muestran que para determinar la naturaleza del sustrato utilizado en la respiración se utiliza normalmente el cociente respiratorio, asimismo el CR indica si la oxidación de los sustratos fue completa, además de indicar el grado en que el proceso es aeróbico o anaeróbico:

- Valores de CR próximos a la unidad (CR = 1), indican que los sustratos utilizados mayoritariamente en el proceso respiratorio son los hidratos de carbono (glucosa). Además indica que la respiración es aeróbica y la reacción es completa.

- Valores de CR mayores a la unidad ( $CR > 1$ ), indican que el sustrato utilizado son los ácidos orgánicos provenientes de las vacuolas, que pueden ser movilizados para su empleo por las mitocondrias como sustratos oxidables en el ciclo de los ácidos tricarboxílicos, además de indicar que la respiración es anaeróbica.
- Valores de CR menores a la unidad ( $CR < 1$ ), indican que se metabolizan proteínas o ácidos grasos ricos en hidrógeno y bajos en oxígeno, además indican que la reacción es incompleta o el  $CO_2$  formado se utiliza en otros procesos de síntesis (formación de ácido málico) a partir de piruvato y  $CO_2$ . (Parra y Hernández, 2005).

### **3.1.6. Cociente de temperatura de respiración**

Sin lugar a dudas, el factor más importante que afecta la vida de poscosecha de cualquier producto agrícola es la temperatura. Esto se debe a que la temperatura tiene un fuerte efecto en las tasas de reacciones biológicas (metabolismo y respiración) (Saltveit, 2004).

El aumento de la temperatura durante la vida poscosecha de un producto agrícola causa un aumento exponencial en la respiración del mismo. Es decir, que la temperatura influye sobre la velocidad de las reacciones químicas presentes en el proceso de la respiración y puede describirse haciendo uso del coeficiente de temperatura  $Q_{10}$  (Parra y Hernández, 2005).

El cociente de temperatura  $Q_{10}$  se utiliza para predecir la tasa de respiración desde una temperatura con una tasa conocida a otra temperatura. Este concepto se basa en las demostraciones del químico alemán Van't Hoff y establece que la velocidad de las reacciones se multiplica por dos por cada aumento de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  en la temperatura (Ecuación 3.5).

$$Q_{10} = \frac{R_2}{R_1} = \text{Constante, alrededor de 2,} \quad \text{Ec. 3.5}$$



dónde:

- $R_1$  representa la velocidad del proceso a una temperatura  $T_1$
- $R_2$  representa la velocidad a una temperatura  $T_1+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Una forma más general del concepto de Van't Hooff aplicable a intervalos de temperaturas iguales o diferentes a  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se establece en la ecuación 3.6:

$$Q_{10} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{10/T_2-T_1} = \text{una constante, alrededor de 2,} \quad \text{Ec. 3.6}$$

dónde:

- $T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas en  $^{\circ}\text{C}$  ( $T_1 < T_2$ ).
- $R_1$  y  $R_2$  las velocidades respectivas en  $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ .

Esta ecuación permite calcular velocidades de reacción desconocidas a temperaturas diferentes o diferentes valores de  $Q_{10}$ , cuando se conoce  $R_1$  y  $R_2$ , pero debe tenerse cuidado en su aplicación cuando la diferencia de temperaturas excede los  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ya que se pueden obtener resultados alejados del valor real (Parra y Hernández, 2005).

### **3.1.7. Calor de respiración**

Un dato importante para el manejo poscosecha del producto es el calor de respiración (QR), que es el calor producido durante el proceso de la respiración (aproximadamente  $673\text{ kcal}$  por cada mol de azúcar utilizado).

El QR es un factor importante para establecer los requisitos de refrigeración y debe tenerse en cuenta cuando se mantienen cantidades considerables de producto durante el transporte o almacenamiento. El calor de respiración ( $\text{BTU ton}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) se puede obtener directamente de la Intensidad Respiratoria ( $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ ), multiplicando los valores de TR por el factor 220 (Parra y Hernández, 2005).

### **3.2. LA COSECHA DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS**

La cosecha es la etapa donde se recolectan los productos del campo en la madurez adecuada con el mínimo de daño y pérdidas, tan rápidamente como sea posible y a un mínimo costo (Thompson, 2007). El grado de madurez de un fruto en el momento de la cosecha afecta su calidad y la duración de su vida comercial. (Kader, 2008).

Por otra parte, el método utilizado para la cosecha también afecta la calidad. Esta se puede realizar de dos formas, mecánica o manual. Para la mayoría de las frutas, hortalizas y cultivos de flor y especialmente para aquellas más susceptibles a los daños mecánicos, se ha realizado tradicionalmente de forma manual teniendo mejores resultados que con la recolección mecánica.

A pesar de numerosas investigaciones y desarrollo de equipos mecánicos de recolección, las ventajas de la recolección manual siguen prevaleciendo sobre la mecánica (Thompson, 2007). Una de las ventajas de mayor importancia es la posibilidad de seleccionar con mayor precisión la madurez de la fruta, lo que es muy importante para los cultivos que presentan un amplio rango de grados de madurez (asincrónicos) y requieren cosecharse varias veces durante la estación.

Debido a los daños que se generan en la recolección mecánica, ésta se limita sólo a unos pocos cultivos y a frutos que por lo general serán procesados (Prusia, 1985). La recolección mecánica está más extendida para hortalizas y productos como raíces, tubérculos y nueces, ya que tanto el suelo como las cáscaras duras actúan como amortiguadores y protectores naturales a los daños mecánicos causados por la máquina (Freifeld, 2005).

En algunos casos, productos como la uva para vinificación, ciruelas para secar, cítricos, aceitunas y algunas hortalizas de hoja verde se cosechan

mecánicamente, ya que el daño de la cosecha no afecta significativamente la calidad del producto procesado (Thompson, 2007).

### **3.2.1 Índices de cosecha**

Para alcanzar una buena calidad del fruto, es necesario que sea cosechado en el estado adecuado de madurez fisiológica, estado en el cual se debe asegurar la calidad organoléptica y nutricional, además de garantizar una vida poscosecha útil. (Parra y Hernández, 2005).

Si se realiza una recolección excesivamente temprana se obtendrán frutos inmaduros mientras que si se hace la recolección muy tarde se obtendrán frutos sobre maduros, estos dos puntos hay que evitarlos debido a la pérdida de calidad del producto además de que se puede originar traumatismos a la planta de origen

En diferentes estudios se ha intentado establecer los índices de madurez, buscando algún indicador que permitan determinar el momento exacto de la cosecha, denominado Índices de Cosecha. Existe gran dificultad para determinar con precisión el índice de madurez fisiológica debido a su comportamiento el cual puede ser climatérico y no climatérico (Freifeld, 2005). En ocasiones y gracias a la experiencia de los agricultores, se puede acertar con el índice de madurez adecuado.

Según Romojaro et al. (2006) citado por Flores (2009), las especies climatéricas aumentan la síntesis de etileno responsable del inicio de la maduración, dotando al fruto de un mayor potencial para su regulación y de la posibilidad de continuar el proceso en la poscosecha. Mientras que en los frutos no climatéricos la posibilidad de actuación es muy limitada, ya que carecen de esta capacidad y deben recolectarse cuando han alcanzado su calidad de consumo. Estos índices de cosecha individualmente no garantizan acertar totalmente con la madurez óptima buscada, pero la combinación de diferentes métodos aumenta la probabilidad de acertar el momento oportuno de la recolección.

Tradicionalmente, los métodos para determinar el estado de madurez han empleado el color, forma, tamaño, sabor, peso específico o gravedad específica, sólidos solubles totales y acidez entre otros. Recientemente, algunos métodos no destructivos como el infrarrojo cercano, los acústicos, imágenes de color y conductancia térmica, se han probado en frutas y hortalizas para medir el índice de madurez, siendo estos métodos más cómodos y fiables que los tradicionales (Asrey et al., 2008).

### **3.2.2 La madurez**

La madurez se entiende como el estado de un producto en un momento dado a lo largo de su proceso de desarrollo. Por tanto van a existir entonces muchos grados de madurez, presentándose el inconveniente de poder definirlos claramente, ya que estos van a depender de las características de cada especie de producto. Los procesos que se llevan a cabo en el proceso de maduración son los que determinan cambios en la consistencia y en las características organolépticas finales como color, olor y sabor (Parra y Hernández, 2005). Se distinguen claramente dos clases de madurez:

#### **➤ Madurez organoléptica**

También llamada degustativa o de consumo, esta señala el final del desarrollo del fruto y el comienzo de la senescencia, los tejidos son fisiológicamente maduros, y se presenta cuando el producto reúne todas las características organolépticas que las hacen apropiadas para el consumo.

#### **➤ Madurez fisiológica**

Comienza antes de finalizar el crecimiento que se lleva a cabo en la planta y solo se completa cuando el fruto permanece unido a la planta. La madurez fisiológica indica el momento en que debe realizarse la recolección del producto, ningún producto debe ser recolectado antes de completar su madurez fisiológica.

Cuando el tejido de un fruto ha alcanzado la madurez, su tasa de respiración debe permanecer prácticamente constante o descender lentamente con el tiempo hasta que alcanza la senescencia (Castelló, 2007). Según el patrón respiratorio que siguen las últimas fases de la maduración, los frutos pueden calificarse como frutos climatéricos y no climatéricos (Barceló et al., 2001).

#### **3.2.2.1 Frutos climatéricos**

Los frutos climatéricos acumulan almidón durante su crecimiento y en la maduración lo hidrolizan a monosacáridos, glucosa y fructosa. Como ello exige una gran cantidad de energía, en estos frutos la maduración se caracteriza por un aumento de la respiración (Castelló, 2007).

En los frutos climatéricos la intensidad respiratoria disminuye hasta llegar a un mínimo, para subir rápidamente hasta un máximo y después volver a disminuir paulatinamente hasta anularse con la muerte del fruto (Parra y Hernández, 2005). El ciclo climatérico se divide en tres fases:

- Preclimaterio: Etapa comprendida hasta la formación completa del fruto. Al final de esta fase se ha llegado al máximo desarrollo de su tamaño. El final del preclimaterio coincide generalmente con la madurez fisiológica
- Climaterio: Comprende desde la aparición de los primeros síntomas de madurez organoléptica, hasta el desarrollo completo de la misma.
- Postclimaterio: Anuncia el comienzo de la senescencia o sobre -madurez y va hasta la muerte del producto por la completa alteración de los tejidos.

#### **3.2.2.2 Frutos no climatéricos**

Los frutos no climatéricos acumulan directamente monosacáridos durante su crecimiento y, por tanto, durante la maduración no experimentan incrementos significativos de su tasa respiratoria (Castelló, 2007). En los frutos no climatéricos

la TR disminuye durante el periodo de vida del fruto llegando a desaparecer con la muerte del mismo. En la Figura 3-1 se observan las curvas para cada tipo de respiración.

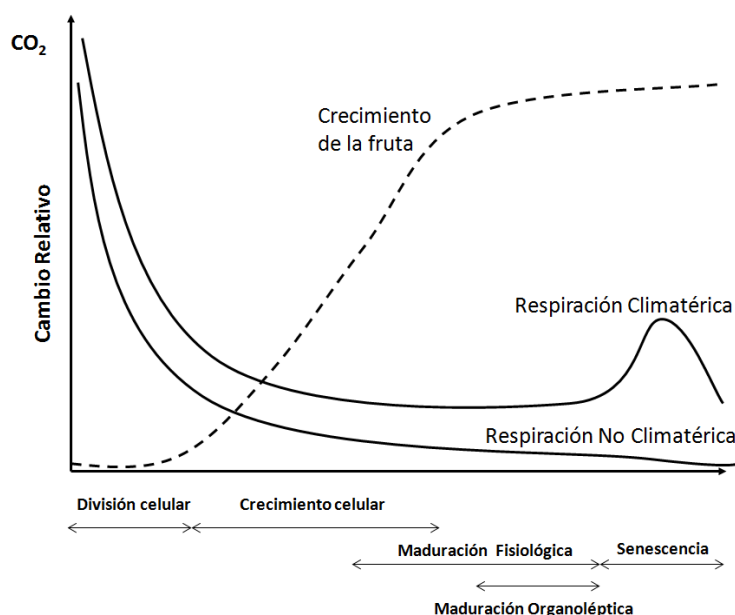


Figura 3-1. Cambios por la respiración y el crecimiento durante el desarrollo de la fruta. Fuente: Parra y Hernández, (2005).

### 3.2.3 El proceso de la maduración

La maduración es una etapa fundamental en la vida del fruto tanto en lo relacionado con su calidad como con su capacidad de conservación (Parra y Hernández, 2005). Un fruto en proceso de maduración sufre una serie de cambios marcados en color, textura y sabor, que indican que se están efectuando cambios en su composición. Es necesario que estos cambios se completen para que el fruto llegue al máximo de su calidad para el consumo (Pantastico, 1979).

#### 3.2.3.1 Cambios durante la maduración

Durante la maduración se producen cambios bioquímicos y estructurales que originan cambios en los constituyentes hasta alcanzar las óptimas características sensoriales para el consumo. Sin embargo, y debido al manejo poscosecha,

generalmente se cosechan en su madurez fisiológica y no en madurez de consumo (Kader, 2007), lo que se evidencia, por ejemplo, en el caso de las mandarinas y algunas naranjas tempranas que se cosechan cuando ya han alcanzado la madurez fisiológica, pero su color exterior es todavía verde y por ello se someten a tratamientos de desverdización (Vidal et al., 2012).

#### ➤ **Cambios de color**

El cambio del color durante la maduración de las frutas está asociado con la ruptura de la clorofila con niveles de carotenoides que permanecen relativamente constantes (Thompson, 1998). En Pantastico (1979) se afirma que el cambio de color se puede deber principalmente a procesos ya sean de degradación o de síntesis o de ambos tipos a la vez, en naranjas el cambio se debe a la descomposición de la clorofila y de la formación de carotenoides, en bananos se debe a la desaparición de la clorofila y baja formación de los carotenoides, estos combinados forman el color amarillo de la cáscara.

#### ➤ **Cambios en la firmeza**

Normalmente las frutas pierden firmeza progresivamente durante la maduración debido a la descomposición de la protopectina insoluble en pectina soluble, bien por hidrólisis del almidón (en el caso de las calabazas) o de grasas (en el caso del aguacate) (Pantastico, 1979). La pérdida de firmeza en bananos durante la maduración se asocia, según Thompson (1998), con tres procesos: el primero es la ruptura del almidón para formar azúcares; el segundo es la ruptura de las paredes de las células debido a la solubilidad de sustancias pépticas; y el tercero al movimiento del agua de la cáscara a la pulpa durante la maduración.

#### ➤ **Cambios en ácidos y carbohidratos**

El desarrollo de la dulzura de la fruta se ve influenciado por ácidos orgánicos que ayudan a formar un equilibrio azúcar - ácido necesario para obtener el sabor característico para cada fruto. Además en las frutas climatéricas, hay un

incremento general en el contenido de almidón, debido a la hidrólisis del almidón a azúcares simples durante la maduración.

#### ➤ **Cambios en los compuestos fenólicos, sabor y aroma**

Los taninos quizás forman el compuesto fenólico más importante desde el punto de vista de la utilización de la fruta ya que pueden darle a la fruta un sabor astringente. Según Thompson (1998), a medida que la fruta madura su astringencia disminuye, lo cual parece estar asociado con un cambio en la estructura de los taninos, que forman polímeros, y no con una reducción de sus niveles.

El sabor es la percepción sutil y compleja en que se combina el gusto, el olor y textura en la boca, (Pantastico, 1979). La madurez también conlleva un aumento en los azúcares simples que dan dulzura, disminuye los ácidos orgánicos y compuestos fenólicos que minimizan la astringencia e incrementan los volátiles que producen un sabor característico (Thompson, 1998; Pantastico, 1979). El aroma de la fruta es característico debido a la elaboración de una mezcla compleja de componentes volátiles individuales.

### **3.3 DAÑOS MECÁNICOS EN POSCOSECHA**

#### **3.3.1 Origen de los daños**

Cuando la recolección no se lleva a cabo con el suficiente cuidado y atención se le puede ocasionar daños al cultivo y al fruto. Por otra parte, un mal diseño de las líneas de acondicionamiento y los procesos a los que se someten los frutos durante su paso por todas las operaciones de acondicionamiento pueden provocar alteraciones en la calidad de los frutos que se manifiestan de inmediato o durante su vida comercial. Para determinar la intensidad del golpe se han realizados diferentes estudios que clasifican el tipo de lesión, en Wills et al., (1984) citado por Freifeld, (2005), clasifica los tipos de lesión de diferentes frutas de acuerdo a la



susceptibilidad que pueden tener a los daños por compresión, impacto y vibración. La clasificación se observa en la tabla 3-1.

Tabla 3-1 Susceptibilidad de las frutas a diversos tipos de lesiones mecánicas: susceptible (S); resistente (R); intermedio (I) (Fuente: Wills et al., 1984).

Fruta	Tipos de Lesión		
	Compresión	Impacto	Vibración
Manzana	S	S	I
Albaricoque	I	I	S
Plátano, verde	I	I	S
Plátano, maduro	S	S	S
Melón	S	I	I
Uva	R	I	S
Melocotón	S	S	S
Pera	R	I	S
Ciruela	R	R	S
Fresa	S	I	R
Calabaza de verano	I	S	S
Tomate, verde	S	I	I
Tomate, maduro	S	S	I

Las lesiones por compresión se generan cuando la presión que soporta el producto está por encima del nivel máximo o umbral. Este daño puede ser una función del tiempo especialmente cuando la presión está cerca al umbral por largos periodos (Thompson, 1998). Esta lesión se presenta generalmente por el exceso de fruta en las cajas, debido a que las cajas se suelen apilar excediendo el límite permitido de agrupamiento, provocando que las cajas inferiores soporten el peso excesivo de las cajas superiores.

Las lesiones por impacto son producidas por el exceso de fuerza sobre la fruta, estas lesiones pueden aparecer en diferentes escenarios, por ejemplo la caída de la fruta al desprenderse del árbol, los choques y roces que ocurren cuando las frutas se transportan o las producidas por las máquinas durante su manejo en poscosecha.

### **3.3.2 Consecuencias de los daños mecánicos**

Todas estas lesiones, cortes, impactos, compresiones y vibraciones generan una coloración parda por oxidación de los taninos y por exposición al aire de los tejidos dañados (Freifeld, 2005). De igual forma, estas lesiones también inducen la pérdida de agua e incrementan la actividad respiratoria y por tanto la velocidad de deterioro, causando pérdidas de producto (Wills et al., 1984). De hecho, las pérdidas ocasionadas por el impacto mecánico son el mayor causante de pérdidas poscosecha de productos agrícolas (FAO, 1993).

Los cambios de color o manchados superficiales de las frutas ocurren como consecuencia de un impacto mecánico suficientemente fuerte como para causar la mezcla de sustrato y enzima, que hace que se produzca la decoloración oscura o pardeamiento enzimático por la oxidación de los compuestos fenólicos de las frutas. La enzima responsable es la polifenoloxidasas, que se localiza en los cloroplastos y mitocondrias. Para que este fenómeno tenga lugar se requiere de la presencia de cuatro diferentes compuestos: el oxígeno molecular, sustratos apropiados, la polifenoloxidasas y la presencia de cobre en el centro activo de la enzima (Freifeld, 2005).

Estos factores determinan la velocidad de pardeamiento, que puede tener lugar muy rápidamente, incluso en 30 minutos tras el golpe (Laurila et al., 1998). La velocidad de pardeamiento depende de factores tales como la concentración y la actividad de la enzima, la cantidad y naturaleza de los compuestos fenólicos, pH, temperatura, actividad del agua y de la cantidad de oxígeno disponible en el entorno del tejido vegetal (Mayer, 1987).

Los daños mecánicos facilitan la difusión de gases, aumentando la respiración aparente debido al escape de CO<sub>2</sub> acumulado en el espacio intercelular del tejido vegetal. Como consecuencia de ello, muchas veces es difícil realizar una clara distinción entre una difusión facilitada y los efectos del golpe en la respiración, cuando lo único que se mide es la producción de CO<sub>2</sub> (Kays, 1991). En este

sentido, Uritani y Asahi (1980) citado por Freifeld, (2005) caracterizaron las diferencias de respuestas respiratorias entre tejidos vegetales dañados por impactos mecánicos y tejidos vegetales dañados por infecciones fúngicas. En ambos casos, los aumentos en la respiración coincidieron con el aumento del catabolismo de carbohidratos almacenados y con un aumento de los azúcares solubles en algunos tejidos. En general, las consecuencias de los impactos mecánicos sobre los frutos se pueden clasificar en:

- ✓ Físicas: la pérdida de una parte del producto, aparición de manchas oscuras, ablandamientos, roturas, entre otras.
- ✓ Fisiológicas: la pérdida de peso causada por el incremento en las pérdidas de agua y por incrementos en la respiración.
- ✓ Patológicas: facilitan la entrada a microorganismos que influyen negativamente en el aspecto del producto, siendo estas especialmente peligrosas ya que pueden generar infecciones que contagien posteriormente a otras frutas sanas durante el almacenamiento o transporte.

### **3.4 MANEJO POSCOSECHA DE LA MANZANA**

#### **3.4.1 Índices de cosecha de la manzana**

Para determinar el momento exacto de la cosecha en manzana se emplean dos tipos de índices, no destructivos y aquellos en que es necesario destruir la fruta para calcular su madurez.

##### **3.4.1.1 Índices no destructivos**

###### **➤ Edad del fruto**

La fruta debe ser cosechada antes de la completa degradación del almidón, dependiendo del número de días transcurridos desde plena floración hasta el momento de inicio de la cosecha comercial. En base a una limitada investigación,

la cosecha de la fruta debe efectuarse alrededor de los 180 y 190 días después de la floración para reducir la incidencia de desórdenes fisiológicos (Mitcham al et, 1996).

#### ➤ **Cartas de color varietales**

Se emplean cartas de color para conocer el grado de maduración que tiene la fruta. En la actualidad se usan cartas de color para las variedades 'Gala' y sus clones, 'Golden delicious', 'Fuji', y 'Braeburn' (Hernández, 2011). En la Figura 3-2 se observan las cartas de color utilizadas para clasificar la variedad 'Golden delicious'.



Figura 3-2. Cartas de color para la variedad 'Golden delicious'

(Fuente: Hernández, 2011).

#### ➤ **Estimación visual de la piel**

Se considera el color de fondo y el color de cobertura (Intensidad y superficie cubierta). En la Figura 3-3 se observa el cambio de color de fondo. Este cambio de color de fondo depende de la degradación de la clorofila (verde) y de la síntesis de los carotenoides (amarillo).



Figura 3-3. Cambio en el color de fondo (Fuente: Hernández, 2011).

En variedades bicolors se usa la cara más coloreada para dar un valor estimativo del color, luego se usa la contraria y se da otro valor, tomando el promedio de ambos como el color estimado para esa muestra. Actualmente, se están empleando métodos electrónicos para medir el color a través de colorímetros que usan el espacio de color HunterLab<sup>1</sup> para representar los valores medidos del color. El color de la fruta registrado por el colorímetro se compara con tablas calibradas donde las coordenadas de color obtenidas corresponden a un estado de madurez de la fruta.

#### 3.4.1.2 Índices destructivos

A continuación se describen los métodos para determinar los índices de cosecha en los que se necesita destruir el material vegetal para obtenerlos:

##### ➤ Firmeza de la pulpa

Se mide con penetrómetros digitales o manuales. Se toma la medida a la altura del plano ecuatorial y en las caras expuestas y no expuestas del fruto. El valor obtenido es diferente para cada variedad pero no debe ser menor de 5 kg cm<sup>-2</sup>.

##### ➤ Contenido de sólidos solubles o índice refractómetro

Se determina mediante el uso de refractómetros manuales o electrónicos. El resultado óptimo para las manzanas, dependiendo de la variedad, no debería ser en ningún caso menor a 12° Brix, dado su impacto sobre el sabor. Por ejemplo, en

<sup>1</sup> El espacio de Hunter-Lab fue desarrollado en 1948 por R. S. Hunter como un espacio de color uniforme que podía leerse directamente de un colorímetro fotoeléctrico (método triestímulo), respectivamente Luminosidad (*lightness*), tonalidad de rojo a verde (*redness-greenness*) y tonalidad de amarillo a azul (*yellowness-blueness*).

La variedad 'Pink Lady' la media de sólidos solubles es de 13° Brix, para 'Golden Delicious' 14° Brix y para 'Lady Williams' 12,3° Brix (Cripps et al., 1993).

➤ **Acidez total titulable o índice de acidez**

Por titulación simple con una solución de NaOH 0,1 N y pH 8,2, expresado en gramos de ácido málico por litro de jugo. La acidez óptima debe estar comprendida, dependiendo la variedad, entre 0,3% y 1%. Por ejemplo en 'Pink Lady' entre 0,71 y 0,9%, para 'Golden Delicious' 0,32% y para 'Lady Williams' 0,83% (Cripps et al., 1993).

➤ **Contenido de almidón**

Se basa en la coloración del almidón con yodo, utilizando la tasa de degradación del almidón para determinar la madurez fisiológica. Para su determinación, se corta el fruto por su diámetro ecuatorial y se sumerge una de sus mitades en una solución de lugol durante 30 segundos. Se enjuaga con agua destilada y se deja secar, el almidón persistente se tiñe de azul verdoso (Moggia y Pereira, 2006).

Existen algunas variedades que degradan en estrella, caso de manzanas 'Golden Delicious', y otras en círculo como la 'Granny Smith'. Para su evaluación se utilizan tablas varietales y la presencia de almidón se expresa en tanto por ciento de la superficie del plano ecuatorial. Este índice solo es viable cuando el fruto está aún en la planta o en el momento de la cosecha.

### **3.4.2 Recolección de la manzana.**

La recogida del fruto depende del destino final de la fruta. Si la fruta se recoge sin haber llegado a su maduración fisiológica, no se podrá comercializar, ya que algunas variedades son muy sensibles al arrugado de la piel y a la pérdida de peso cuando están inmaduras (Casaca, 2005). Por otra parte, la manzana es una fruta muy delicada y por ello es necesario evitar las temperaturas altas durante la recolección, por lo que se efectúa durante las primeras horas del día

➤ **Recolección manual.**

Existen diferentes métodos para la recolección manual, uno de ellos es por medio de tijeras donde recolector corta el pedúnculo de la fruta y después la deposita en un recipiente, además se emplean escaleras para las zonas altas del árbol donde existe un difícil acceso a la fruta. Otro método es el uso de pértigas diseñadas para cortar la fruta, las cuales en un extremo llevan cesto pequeño con un sistema de cuchillas conectadas a una guaya. Cuando se acciona la guaya se corta el pedúnculo de la fruta por medio de las cuchillas y el fruto cae en el cesto evitando que el operario use escaleras. Además de las pértigas y las tijeras, para las zonas accesibles se emplean picking bag. Estas bolsas son normalmente largas para acompañar a la fruta en su descarga a la caja o al palot, minimizando así los golpes.

➤ **Recolección manual asistida.**

En este tipo de recolección se emplea tanto personal humano como máquinas de combustión interna. Esta recolección se apoya en una plataforma móvil que posee unas bandas transportadoras en donde el recolector deposita la fruta que es cortada manualmente por medio de tijeras. La fruta que entra a la plataforma es almacenada en cajas automáticamente. A diferencia de la plataforma anterior, existen en el mercado plataformas que poseen sistemas de clasificación por tamaño, peso y por visión artificial, estas plataformas han sido probadas en naranjas (Cubero et al., 2013, Vidal et al., 2012) y con buenos resultados siendo posible implantar esta tecnología a diferentes tipos de frutas como las manzanas.

➤ **Recolección mecanizada.**

En este tipo de recolección se usan dos tipos de vibradores mecánicos, el primero son vibradores manuales a motor los cuales se ubican en las ramas de los arboles produciéndoles una vibración que termina en el desprendimiento del fruto. El segundo es un vibrador de troncos conectado al tractor que pasan entre las líneas de la plantación, provocando vibraciones que hacen desprender el fruto del árbol,

estos frutos caen sobre plataformas automáticas o bandejas situadas en la parte inferior y lateral de la máquina (Thompson, 2007).

Además existen modificaciones del sistema anterior los cuales son más económicos ya que remplazan las plataformas automáticas por bastidores de lona. Estos bastidores están provistos con ruedas que permiten que el operario lo empuje conduciéndolo hacia los árboles y recogiendo a mano los frutos depositados sobre él. Este tipo de recolección se ha probado incluso en naranjas (García-Navarrete, 2011). Este tipo de recolección mecánica es muy propensa a ocasionar daños mecánicos, por lo cual el destino de la fruta es la industria de transformación.

### **3.4.3 Operaciones de acondicionamiento para la manzana**

Una vez recolectado el fruto, se transporta al centro de acopio, donde se descarga y en función de su uso, determinado por las características del fruto, se destinan a un fin u otro, que depende de la clasificación, determinada por una serie de parámetros exigidos normalmente en todos los centros de abastecimiento, como:

- ✓ Calibre.
- ✓ Estado de madurez.
- ✓ Firmeza.
- ✓ Azúcares.
- ✓ Acidez.
- ✓ Color.

Una vez se ha determinado los parámetros anteriores se define el destino de los frutos que puede ser para:

- ✓ Uso industrial.
- ✓ Frío normal.
- ✓ Conservación en atmósfera controlada.
- ✓ Conservación en Oxígeno Ultra Bajo (U.L.O.).
- ✓ Premaduración.
- ✓ Salida al mercado doméstico.
- ✓ Exportación.



El tiempo que debe transcurrir entre la recolección y la entrada de la fruta en el centro de acopio debe ser menor de 6 horas. A la llegada al centro de acopio la fruta se lava con una mezcla de agua, fungicidas, compuestos de calcio, productos antiescaldado, entre otras prácticas. Esta operación se realiza en un drencher o duchador de fruta, que consta de una cabina con espacio para dos o varios palots y un equipo aplicador del tratamiento. Mientras un palot está siendo duchado, el anterior está escurriendo el agua. Una vez escurrido se sustituye por otro palot con fruta por tratar.

Una vez lavada la fruta debe preenfriarse lo más pronto posible, hasta 4-5° C en un máximo de 24 horas. Una vez preenfriada, la fruta se selecciona y clasifica. Esta selección consiste en separar los frutos en función de algunos de los parámetros anteriormente citados y se puede realizar por medio de máquinas clasificadoras o por medio de la adquisición y análisis de imágenes a gran velocidad, aunque por ser una tecnología relativamente costosa, la mayoría de empresas selecciona la fruta de manera manual.

Finalmente la fruta es empacada ya sea en cajas de cartón para su comercialización o en palots para almacenarlas por largos periodos.

#### **3.4.4 Almacenamiento y conservación de manzana**

Una vez empacada, las manzanas se almacenan en cámaras de conservación a la espera de su destino final. Las condiciones óptimas de conservación de las manzanas varían en función de la variedad, momento de recolección, región y localización del cultivo, así como del destino comercial de la fruta, dependiendo de esas condiciones, generalmente se utilizan tres tipos de conservación:

- ✓ Frío normal.
- ✓ Conservación en atmósfera controlada (C.A.)
- ✓ Atmósfera controlada en Oxígeno Ultra Bajo (U.L.O.).

➤ **Frío normal.**

El enfriamiento debe alcanzar rápidamente las condiciones que se consideran como más adecuadas para la correcta conservación (Delhom, 1987). El frío reduce la velocidad de las reacciones metabólicas que se desarrollan en el fruto, especialmente la velocidad de la respiración.

Eso le permite al fruto economizar sustancias de reserva como los azúcares y los ácidos orgánicos, alargando así su período vital y retrasando todos los fenómenos de senescencia y descomposición.

Esta disminución de la intensidad respiratoria se representa por medio del  $Q_{10}$ , qué para el caso de las manzanas, se sitúa en 2.3, medido entre 20 °C y 10 °C y 3.2 medido entre 10 °C y 0 °C. Es decir, que si bajamos la temperatura de 20 °C a 0 °C, la actividad respiratoria de las manzanas disminuye más de siete veces (Delhom, 1987). Las temperaturas recomendadas para la conservación de las manzanas solo refrigeradas, sin ningún tipo de modificación de la atmosfera, se presentan en la Tabla 3-2. Los valores señalados son orientativos; los valores reales de almacenamiento vendrán dados en función de la madurez de la fruta, así como el destino comercial que se le vaya a dar.

Tabla 3-2. Valores más recomendables para la temperatura de conservación de las manzanas<sup>2</sup>.

<b>Variedad</b>	<b>Temperatura °C</b>
Grupo Golden	0 ± 1,0
Grupo Delicious	0 ± 1,0
Grupo Granny Smith	0,5 ± 0,5
Grupo Fuji	0 ± 1,0
Grupo Gala	0 ± 1,0

---

<sup>2</sup> Fuente: Fomesa. <http://www.fomesa.net/Calidad/Variedades/MZ>

En general, es aconsejable que la fruta no disminuya su temperatura por debajo de los 5 °C para que la humedad relativa no descienda demasiado (Delhom, 1987). La humedad relativa de la cámara refrigerada es un factor importante en la conservación de la fruta.

Mantener en el ambiente de la cámara entre el 90% y 95% de humedad sería lo adecuado, ya que por debajo se pueden tener pérdidas importantes de peso por deshidratación, llegando a producirse marchitez del fruto. Por el contrario, el exceso de humedad por encima del 95% crea condiciones favorables para el desarrollo de hongos y posteriormente podredumbres. Con el aumento de la humedad la producción del aroma se reduce e incluso puede inducir que se presente un ligero sabor a moho.

#### ➤ **Conservación en atmósfera controlada.**

La conservación en atmósfera controlada se basa no sólo en la disminución de la temperatura ambiente, sino también en la modificación de los contenidos en O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> de la atmósfera interior de la cámara.

En las atmósferas modificadas se reduce la concentración de O<sub>2</sub> del 21% presente normalmente en el aire, a valores entre 2 y 5%. El CO<sub>2</sub> se aumenta de 0,03% (concentración normal en el aire), hasta los valores entre el 3% y 5% e incluso hasta 15% a 20% por periodos muy cortos de tiempo.

El O<sub>2</sub> es indispensable para la respiración y su disminución provoca una ralentización de los procesos respiratorios. Pero esta disminución es función de la temperatura ambiente, es decir, hay una interacción entre la temperatura y la concentración de O<sub>2</sub>. Para temperaturas del orden de 0 a 2 °C, la concentración de O<sub>2</sub> debe ser inferior al 15% para que tenga una acción relevante sobre la intensidad respiratoria.

La acción combinada de los tres elementos considerados (disminución de la temperatura y del O<sub>2</sub>, y aumento del CO<sub>2</sub>) genera una disminución de la intensidad respiratoria y lleva a una mejor preservación del contenido de los ácidos del fruto, así como a una mayor dureza y una menor evolución del color. Las condiciones de conservación más recomendables se muestran en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Valores más recomendables para la conservación de las manzanas en atmosfera controlada.<sup>3</sup>

Variedad	Temperatura °C	O <sub>2</sub> %	CO <sub>2</sub> %
Grupo Golden	0 a 3	3	1,5 a 3
Grupo Delicious	0	1 a 2	2 a 4
Grupo Granny Smith	1 a 2	1,5	1
Grupo Fuji	0 a 1	1,5 a 2	<0,5
Grupo Gala	0 a 1	1,5 a 2	1 a 2

➤ **Atmosfera controlada en oxígeno ultra bajo.**

La concentración de O<sub>2</sub> necesaria para que produzca algún efecto debe ser inferior al 3%. Cuando la conservación se produce con concentraciones entre 1,8 y 2,0% de O<sub>2</sub> se dice que es una concentración de bajo oxígeno (LO, del inglés *Low Oxygen*), mientras que para concentraciones entre 1,0 y 1,2% se dice que son concentraciones de ultra bajo oxígeno (ULO, del inglés, *Ultra Low Oxygen*) (Altisent, 2010).

La tecnología de conservación en ULO consiste en una modificación de la atmósfera presente en las cámaras de almacenamiento de frutos, disminuyendo la concentración de oxígeno y aumentando la concentración de dióxido de carbono en comparación con el aire ambiente. El empleo de esta técnica, junto con la refrigeración, permite alargar el período de almacenamiento así como preservar durante más tiempo la calidad del fruto en la mayoría de variedades de manzana, además de disminuir la incidencia de desórdenes fisiológicos durante largos

<sup>3</sup> Fuente [http://www.infoagro.com/frutas/frutas\\_tradicionales/manzana3.htm](http://www.infoagro.com/frutas/frutas_tradicionales/manzana3.htm)

periodos de almacenamiento. En particular, se consigue disminuir las pérdidas de firmeza y acidez, y mantener el color verde de la epidermis (Altisent, 2010).

Delaporte et al. (1971), citado por Contreras (2010), observaron que la pérdida de ácido ascórbico en manzanas se puede reducir mediante el almacenamiento en una atmósfera con bajo nivel de  $O_2$ . Sin embargo, la aplicación de oxígeno ultra bajo dio lugar a una disminución del ácido ascórbico en diferentes variedades de manzana en comparación al almacenamiento en aire normal. Por otro lado, incrementar la concentración de  $CO_2$  por encima de un determinado umbral parece tener un efecto negativo sobre el contenido de vitamina C en manzanas.

### **3.5 VISIÓN ARTIFICIAL EN LA POSCOSECHA DE LAS FRUTAS**

Parte de los daños se producen durante el proceso de recolección y las frutas dañadas se eliminan en las líneas de acondicionamiento en poscosecha. Se han realizado diferentes estudios que tienen como objetivo predecir la probabilidad de estos daños y determinar los umbrales de impacto respecto a los puntos críticos de la manipulación (Hasegawa et al., 1989). En el caso de las mandarinas satsumas se determinó que los principales daños se producen en la recepción de las cajas de campo, en el cepillado, en la clasificación, por el transporte interno en el almacén y cuando se pesan y empaacan los frutos.

En las líneas de acondicionamiento la velocidad de trabajo contribuye a que los productos agrícolas sean golpeados. Bajema y Hyde (1998) clasifican los impactos de acuerdo a la velocidad de las cintas, si la velocidad de aproximación es de  $0,25 \text{ m s}^{-1}$ , se consideran los daños como de bajo impacto, si la velocidad supera los  $4 \text{ m s}^{-1}$  se consideran de alto impacto. Los mismos investigadores encontraron que es frecuente que las contusiones o magulladuras aparezcan con la caída de los frutos a una altura menor de 3,2 mm (Bajema et al., 2000).

Existen normas de calidad que establecen los niveles de tolerancia de daños establecidos para eliminar la fruta que no cumple con los requerimientos de calidad (Bollen et al., 2001). Sin embargo, estos criterios de calidad son difíciles de interpretar y mantener por los operarios, ya que la inspección es una tarea repetitiva, subjetiva, influenciada por el cansancio y se debe inspeccionar una enorme cantidad de fruta en poco tiempo.

Una alternativa más objetiva, competitiva y de menor coste a los sistemas manuales de inspección viene de la mano de los sistemas de visión por computador. Estos son una parte cada vez más importante en la automatización de los procesos en la industria y un elemento absolutamente necesario en las tareas de inspección de calidad del producto, donde el mantenimiento de la calidad de una elevada producción exige la inspección individual de la totalidad de la producción.

### **3.5.1 Aplicación de la visión por computador en los procesos de la agricultura.**

La aplicación de la visión artificial en la agricultura ha aumentado considerablemente en los últimos años y especialmente en sistemas de inspección de fruta fresca instalados en almacenes de acondicionamiento de la fruta (Cubero et al., 2011). Este tipo de sistemas de inspección automática tratan, por lo general, de analizar algunos parámetros externos como el tamaño, la forma o el color.

El análisis simultáneo de varios parámetros morfológicos puede determinar la forma de objetos irregulares o distinguir entre objetos con formas y áreas diferentes. Además, como se tiende hacia una recolección mecanizada que puede ocasionar daños a la fruta debidos a los golpes que recibe durante su caída, detectar la presencia de daños, como los producidos por golpes u objetos extraños es otro de los objetivos principales de estos sistemas automáticos de inspección (Blahovec, 2006).

Cabe añadir que la inspección automática permite generar estadísticas de aspectos relacionados con la calidad del producto inspeccionado, lo que redundará en un mayor control sobre el producto y facilitando la trazabilidad del mismo. No obstante, la automatización de la inspección de productos agrícolas presenta algunas particularidades y problemas con respecto a otros sectores, por ejemplo:

- ✓ La gran variabilidad de los productos, debida a diferencias entre especies y variedades, como a diferencias individuales de forma, color, tamaño, y otros.
- ✓ La evolución fisiológica que continúan experimentando los frutos tras la recolección, dada su condición de “elementos vivos”.
- ✓ La dificultad en la selección de las características apropiadas para evaluar la calidad, que depende del tipo de producto.
- ✓ La fragilidad del producto, que condiciona el tipo de máquinas y técnicas que se utilizan.
- ✓ Los bajos beneficios medios obtenidos que limitan las posibles inversiones en automatización.

La amplitud espectral de los sistemas ópticos artificiales les dota de una capacidad para la predicción de la madurez o la inspección de la calidad. Los procesos de poscosecha se han beneficiado enormemente de las técnicas de visión artificial, ya que permite inspeccionar la calidad de los productos de manera individual, estimando automáticamente características como presencia de defectos, color, forma, tamaño e, incluso, la presencia de contaminación en plantas, granos, frutos secos, vegetales y frutas, trasladando todas estas posibilidades también al manejo de productos de origen animal (Du y Sun, 2006).

Una característica destacable de esta tecnología es la posibilidad de estudiar la fruta en regiones del espectro electromagnético en el que el ojo humano no ve, como el ultravioleta o el infrarrojo.

### **3.5.2 Sistemas de visión artificial convencionales e hiperespectrales**

Los sistemas de visión comúnmente empleados en las tareas de inspección automática, a semejanza del ojo humano, usan la radiación emitida por los cuerpos en tres longitudes de onda concretas, centradas en los colores rojo, verde y azul (Espacio de color RGB – red, green, blue), y las combinan para obtener las imágenes a color. Al adquirir y combinar imágenes únicamente de estas tres longitudes de onda se está desaprovechando gran parte de la información de la reflectancia de las frutas en el resto de las longitudes de onda del rango visible y en otras regiones del espectro electromagnético, ya que en ocasiones los defectos se aprecian mejor en otras longitudes de onda intermedias y concretas, alejadas del rojo, verde o azul.

Los sistemas hiperespectrales de imagen surgen del campo de investigación de la percepción remota, expandiéndose rápidamente su uso a otros campos de la ciencia como la tecnología alimentaria (Kim et al., 2001) o la agricultura de precisión (Yang et al., 2002; Chen et al., 2002; Muhammed, 2005;).

Las imágenes hiperespectrales constituyen una fuente de información mucho más amplia que una imagen convencional. Una imagen hiperespectral está constituida por un conjunto de imágenes monocromáticas (variando el número en función de la resolución del sistema), que se unen formando un hipercubo, en el que dos dimensiones constituyen las dimensiones espaciales y la tercera componente la espectral (Gómez-Sanchis, 2009).

### **3.5.3 Aplicaciones de los sistemas de visión artificial convencionales e hiperespectrales en productos agrícolas.**

El empleo de los sistemas de visión artificial en productos agrícolas se ha estudiado desde los años setenta, en Gaffney (1973) demostró que los distintos tipos de defectos externos de los cítricos presentan una reflectancia distinta para



cada longitud de onda, pudiéndose llegar a detectar de qué tipo de defecto se trata mediante métodos espectrométricos.

Blasco, (2001) estableció las bases para el desarrollo de un sistema automático de inspección para cítricos, que integre la información proveniente de zonas visibles y no visibles del espectro electromagnético, con el fin de detectar la presencia de manchas en la piel de la fruta y de proporcionar información sobre su origen. utilizó distintos filtros interferométricos colocados en las ópticas de diferentes cámaras sensibles al ultravioleta, visible e infrarrojo cercano, con el fin de caracterizar e identificar defectos superficiales en cítricos.

Gómez-Sanchis, (2009) desarrolló un protocolo para la detección temprana de daños producidos por hongos en cítricos, a través de técnicas espectrales. Este autor desarrolló métodos de pre-procesado de imágenes hiperespectrales e implantó técnicas de análisis de imágenes, para detectar daños producidos por podredumbres en cítricos, con la finalidad de obtener un grupo reducido de bandas o longitudes de onda mediante métodos de selección de características, que permiten detectar los frutos afectados por podredumbres tempranas mediante algoritmos automáticos de clasificación.

Este trabajo encontró 20 longitudes de onda y las clasifico por medio métodos no lineales CART (árboles de decisión y regresión) y en lineales LDA (análisis de discriminante lineal) en un ranking de acuerdo a su poder predictivo y al método de selección de características.

Los métodos de selección usados fue el CA (análisis de correlaciones), MI (método basado en información mutua) SW (stepwise regression), GALDA (algoritmos genéticos con LDA), para una región del espectro entre 400 y 1020 nm. La mayor predicción de los daños se obtuvo con el método GALDA con una predicción del 92%.

El empleo de este tipo de sistemas para la detección de daños en fruta ha experimentado un importante incremento en los últimos años (Cubero et al., 2011; Lorente et al., 2012).

En Cubero et al (2010) se usó un sistema de visión artificial compuesto por una cámara de video a color y un computador en una plataforma móvil asistente a la recolección de naranjas, con el fin de clasificar las frutas en tres colores, dependiendo de su estado de madurez, con este sistema se logró un coeficiente de correlación del 99% comparándolo con un colorímetro de laboratorio, además se usó un algoritmo para detectar los daños mecánicos visible con lo cual se tuvo un acierto del 88%.

Los mismos investigadores (Cubero et al., 2011) remplazaron el sistema de cámara-computador por el de una cámara inteligente la cual ya tiene integrada el computador mejorando la velocidad de comunicación pero reduciendo la velocidad de análisis de imagen, con este sistema se mantuvo el coeficiente de correlación concluyendo que el algoritmo de análisis tiene una alta confiabilidad sin importar el hardware que se utilice. En este trabajo no se empleó algoritmo para la detección de daños debido a la baja velocidad de procesamiento de la cámara inteligente.

En Lorente et al (2012), se revisó los diferentes trabajos que emplean sistemas hiperespectrales para el estudio de la calidad de frutas y explica las diferentes tecnologías disponibles para adquirir las imágenes y su utilización para la inspección no destructiva de las características internas y externas de diferentes productos agrícolas, además se presta atención en los trabajos destinados a reducir la dimensionalidad de los datos de las imágenes, con detalles de las técnicas estadísticas más utilizadas para esta tarea.

El uso de este tipo de tecnología para la detección de golpes en pepinos ha sido empleada por Ariana et al (2006) utilizando un sistema hiperespectral en el rango infrarrojo entre 900-1700 nm, el método estadístico utilizado fue el análisis de

componentes principales (PCA), y encontró que a medida que pasa el tiempo, después del daño mecánico, la predicción del golpe disminuye de 95 a 75% en un período de 6 días, las longitudes de onda que daban mayor precisión de detección están entre 988 y 1085 nm.

Xing et al., (2005), utilizan un sistema de visión hiperespectral para detectar golpes en manzanas "*Golden Delicious*", en la región espectral entre 400 y 1000 nm. El método estadístico utilizado fue el análisis de componentes principales (PCA). Los resultados de la clasificación indicaron que el 93% de las manzanas no golpeadas fueron reconocidos como sanas, y un 86% de las manzanas golpeadas se reconocieron con el golpe.

#### **3.5.4 Tratamiento estadístico en imágenes hiperespectrales**

Las imágenes hiperespectrales constituyen una fuente de información mucho más amplia que una imagen convencional. Una imagen hiperespectral está constituida por un conjunto de imágenes monocromáticas que forman un hipercubo, en el que dos dimensiones constituyen las dimensiones espaciales y la tercera es el componente espectral.

Este hecho, que por una parte es uno de los grandes atractivos de los sistemas hiperespectrales, puede convertirse en un problema, ya que estas imágenes generan mucha información redundante o que no es discriminante en el problema de clasificación estudiado (Shaw y Burke, 2003).

Por otro lado, además los sistemas de imágenes hiperespectrales tienen problemas similares a los presentados por los sistemas tradicionales de visión por computador, basada en imágenes a color o monocromática. Estos problemas están relacionados con la mala iluminación, la presencia de objetos o ruido en las imágenes, u otros problemas que deben ser corregidos en el pre-procesamiento de datos.

Para eliminar la información redundante y los posibles problemas que se presenten en las imágenes, se utilizan diferentes técnicas estadísticas multivariantes. Estas técnicas buscan las variables menos representativas para eliminarlas, simplificando así los modelos estadísticos en los que el número de variables sea un problema y para comprender la relación entre varios grupos de variables.

Las técnicas estadísticas más utilizadas encontradas en la literatura científica para el análisis de imagen espectral en frutas y verduras según Prats-Montalbán et al. (2011) son el Análisis de Componentes Principales (PCA), Redes Neuronales Artificiales (RNA), Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS), Análisis Discriminante Lineal (LDA), y el Análisis Discriminante por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS-DA), siendo este último uno de los más usados.

#### **3.5.4.1. Análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales**

El Análisis Discriminante por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS-DA) es un método de regresión lineal supervisada basado en la combinación de una matriz de observables (datos espectrales) y una matriz de valores cualitativos. El objetivo del PLS-DA es encontrar las variaciones relevantes en la matriz de observables que presenten un máximo de covarianza (Izquierdo, 2011).

PLS-DA proporciona un método gráfico de fácil comprensión para identificar las regiones espectrales que marcan una separación entre clases, mostrando la bondad de la separación y la significancia estadística del resultado. PLS-DA parte de realizar un modelo PLS para reducir la dimensión de la matriz y establecer las fronteras entre las clases. Luego hace un análisis discriminante y clasifica las nuevas muestras según el modelo confeccionado.

En el PLS-DA, la matriz X consiste en la caracterización multivariada (variables independientes) de las muestras. Luego, para obtener un código de identidad de las clases, se usa como matriz Y (variables dependientes), una matriz de variables

simuladas (falsas), la cual describe la membresía de clases de cada muestra del conjunto de entrenamiento. Una variable simulada es una variable artificial que asume un valor numérico discreto para describir las clases. A partir de esta matriz simulada es que se crea un modelo PLS global con variables binarias para cada clase como respuesta. Su función es identificar variables latentes características que puedan ser utilizadas para integrar las muestras a una clase. Con el modelo encontrado se realiza una predicción para el conjunto de muestras a clasificar. Calculándose un umbral de clasificación para cada clase, pertenecerán a ella, las muestras cuyos valores de Y estén por encima de ese umbral (Nuñez et al., 2009).

Dicho umbral es calculado usando la distribución observada de los valores predichos y las estadísticas Bayesianas. Estas estadísticas también pueden indicar la probabilidad de encontrar un valor de Y específico si la muestra a la que le corresponde pertenece a la clase (Eriksson et al., 2001).

#### **3.5.4.2. Corrección multiplicativa de la dispersión (MSC)**

La corrección multiplicativa de la dispersión MSC (Multiplicative Scatter Correction), corrige efectos aditivos, multiplicativos y las diferencias en la dispersión de la luz entre las muestras, calculando un espectro promedio entre las muestras de calibración y usándolo como espectro de referencia, después cada espectro es calculado con base a este espectro de referencia (Botero, 2009).

En resumen MSC es usada para remover efectos aditivos de dispersión y de línea base, resultando en espectros con varianza uno y media cero, utilizando un espectro de referencia para todos los espectros analizados (Kooistra et al, 2001).

#### **3.5.4.3. Aplicaciones del tratamiento estadístico en imágenes hiperespectrales de manzanas.**

En la actualidad existen gran variedad de aplicaciones de las técnicas espectrales en manzanas tales como la detección de defectos superficiales o contaminantes en manzanas.

En Kim et al (2005) usaron manzanas “Red Delicious” contaminadas con heces de vacas lecheras. Las manchas generadas por las heces no eran visibles al ojo humano, para esto utilizaron imágenes de fluorescencia multiespectrales, con bandas de frecuencia centradas a los picos de emisión de color rojo de heces de vaca y de las manzanas. Los resultados obtenidos indican que las bandas en 670 nm proporcionan el mayor potencial para la detección de la contaminación fecal, además la combinación de las bandas 670, 450 y 550 nm, mejorar la sensibilidad de la detección, independientemente de las coloraciones de manzana con una tasa de éxito del 100%.

Mhel et al. (2004) han empleado sistemas hiperspectrales para detectar contaminación y defectos superficiales en “Red Delicious”, “Golden Delicious”, “Gala”, y “Fuji”. En este trabajo se empleó imágenes espectrales en el rango de 430 a 900 nm las cuales fueron analizadas a través de imágenes monocromáticas y el método estadístico asymmetric second difference para clasificar las manzanas sanas y contaminadas.

El método estadístico asymmetric second difference uso la longitud de onda de absorción de clorofila a 685 nm y dos bandas en la región del infrarrojo cercano proporcionando una excelente detección de las zonas defectuosas o contaminadas, independientes del color de la manzana y el cultivar. El uso de este método fue experimental ya que es simple y requiere menos cálculos que otros métodos tales como PCA, si esta técnica se validara con otros métodos de análisis espectral podría ser fácilmente implementado como una técnica de imagen multiespectral.

En manzana Nicolai et al. (2006) usó un modelo de calibración con PLS-DA, para discriminar los píxeles de la piel de la manzana sana y los píxeles con lesiones bitter pit. Utilizó una validación cruzada dejando uno fuera ó (Leave-one-out cross-validation) para determinar el número de variables latentes basándose en la

minimización de la raíz del error cuadrático medio, de la validación cruzada previamente a la segmentación. El sistema es capaz de identificar el 98% de las lesiones bitter pit, incluso cuando no es visible a simple vista, pero no podía discriminar entre lesiones bitter pit y tejidos corchosos.

Además, en el trabajo de Xing et al., (2007), se utilizó un sistema de imágenes hiperespectrales para detectar golpes en manzanas '*Golden Delicious*', el rango espectral usado fue entre 400 y 1000 nm. En este trabajo se construyó un modelo PLS-DA para extraer y resumir la información espectral de los píxeles de las regiones magulladas o dañadas en manzana, se les asignó un valor de 0 y a los píxeles del tejido sano un valor de 1. Estos valores se utilizaron en el modelo PLS-DA como variables dependientes y los espectros de reflectancia normalizada como variables independientes. Y se utilizaron los gráficos *loadings plot* del PLS de las variables latentes para determinar las longitudes de ondas eficaces para la discriminación.

En el trabajo anterior de Xing et al., (2005), ya mencionado, se usó un sistema de visión hiperespectral para detectar golpes en manzanas '*Golden Delicious*', en la región espectral entre 400 y 1000 nm. El método estadístico utilizado fue el análisis de componentes principales (PCA). Los resultados de la clasificación indicaron que el 93% de las manzanas no golpeadas fueron reconocidos como sanas, y un 86% de las manzanas golpeadas se reconocieron con el golpe.

Menesatti et al. (2009) estudiaron la determinación del momento de la cosecha de las manzanas cv. '*Golden Delicious*', a través de la prueba de almidón y yodo, en la región espectral entre 1.000 y 1.700 nm utilizando PLS-DA con el objetivo de desarrollar un método para evaluar el índice de almidón, para evitar los métodos químicos, aunque el método no deja de ser destructivo.

Aplicaron PLS-DA en las imágenes hiperespectrales NIR para clasificar los píxeles en dos clases (con almidón o sin almidón), utilizando su espectro de reflectancia

NIR. La clasificación del almidón de cada manzana se basó en el porcentaje de áreas libre de almidón sobre el total de píxeles clasificados (con almidón y sin almidón). La media de la clasificación de los píxeles obtenida a través del modelado PLS-DA clasificó correctamente 80,81% de los píxeles totales, mientras que el modelo único, es decir, un único modelo que incluyó todas las frutas, resultó en 66.33%.

En el trabajo de Wang et al (2012) usaron imágenes hiperespectrales de dispersión basadas en modelos PLS y redes neuronales para predicción de la firmeza en manzanas 'Golden Delicious', encontraron que las longitudes de onda para la predicción se obtuvieron principalmente en dos grandes regiones alrededor de 530 a 640 nm y 780 a 1000 nm obteniendo un coeficiente de correlación de 0,828.

Uno de los métodos de análisis de imágenes hiperespectrales más usados para evaluar la calidad de las manzanas es el método del Análisis Discriminante por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS-DA) los investigadores lo usan por su efectividad a la hora de clasificar píxeles y discriminarlos entre píxeles sanos y píxeles afectados o contaminados.



## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para el análisis de los momentos donde ocurre el daño mecánico por golpe durante la poscosecha de la manzana 'Fuji', se realizó una visita de campo en la región de Huesca (España) donde se encuentra la zona productora Osso de Cinca. Las características edafo-climáticas de la zona donde se obtuvieron las muestras se describen en el anexo F. Se evaluó el proceso que tienen las manzanas desde la recolección hasta que se almacena la fruta para su comercialización.

### **4.1 Comportamiento fisiológico poscosecha de manzanas estresadas por daño mecánico para los tratamientos A y B**

Para el estudio se utilizaron manzanas del cultivar 'Fuji', las cuales se estresaron por medio de un daño mecánico y se analizó su comportamiento fisiológico poscosecha.

### **4.2 Diseño Experimental**

Se utilizó un diseño completamente aleatorio, dos tratamientos:

- Tratamiento A: 100 kilogramos de fruta (350 frutas) almacenado a una temperatura de 4 °C en cámara frigorífica.
- Tratamiento B: 100 kilogramos de fruta (350 frutas) almacenado a temperatura ambiente 20 °C, reflejando las condiciones que puede tener la manzana en el momento de la clasificación, transporte, o comercialización.

Para los tratamientos se realizaron los siguientes ensayos:

- ✓ Firmeza.
- ✓ Sólidos solubles totales.
- ✓ Acidez.
- ✓ Intensidad Respiratoria.
- ✓ Toma de Imágenes Espectrales.

### **4.3 Preparación de las muestras**

Cada una de las frutas de los tratamientos se marcó, y se golpeó con un péndulo mecánico con esfera de hierro, graduado a 90 grados para controlar el lugar del golpe y la fuerza de impacto (Aunión, 2002). La fuerza del golpe fue de 1.5 N, calculada por medio de la ecuación A.1. Esta fuerza fue mayor a la usada por Freifeld (2005). Las manzanas golpeadas se almacenaron a la temperatura correspondiente a cada tratamiento. Inmediatamente se tomaron las muestras para empezar los ensayos. Este procedimiento se realizó siete días consecutivos para seguir la evolución del golpe (fase uno). Tres días después de la finalización de la primera fase se repite nuevamente los ensayos durante 7 días consecutivos (fase dos).

### **4.4 Ensayos destructivos**

Todos los ensayos que se describen a continuación se realizaron en un mismo día durante siete días consecutivos para cada fase, exceptuando los ensayos de respiración que se realizaron cinco días.

#### **4.4.1 Firmeza**

La firmeza se midió con dos instrumentos.

##### **➤ Texturómetro Instron Universal**

En cinco frutos por tratamiento se retiró el epicarpio y se midió en las tres zonas del golpe y en tres zonas sanas de cada fruto, mediante el texturómetro (Instron Universal Testing Machine 3343; Instron Corp., EE.UU.) con punzón de 11 mm de diámetro y una velocidad de punción de  $5 \text{ mm min}^{-1}$  (Figura 4-1).



Figura 4-1. Texturómetro Instron Universal Testing.

#### ➤ **Medidor Durofel DFT**

En seis frutos por tratamiento se midió en las tres zonas del golpe, tres veces y en las tres zonas sanas una vez, para cada fruto, mediante el (Durofel DFT 100 Digital Firmness Tester; Agro Technologie, Francia), (Figura 4-2). La medida de firmeza se determina en un rango y resolución de 1 a 100 gd (graduación durofel – resolución 1 graduación – precisión +/- 1 graduación).



Figura 4-2. Medidor de firmeza Durofel Modelo DFT 100 Digital Firmness Tester.

#### **4.4.2 Sólidos solubles totales**

De seis frutos por tratamiento se hacen cuatro zumos, dos de la zona con golpe y dos de la zona sana (en tres frutos cada uno) y se miden los grados Brix, con un

refractómetro digital marca Atago (Modelo PR-32α; Atago Co. Ltd, Japón), (Figura 4-3).



Figura 4-3. Refractómetro digital Atago Modelo PR-32α; Atago.

#### 4.4.3 Acidez titulable

Con el zumo sobrante de las muestras anteriores se midió la acidez, expresada como porcentaje de ácido málico, determinando el volumen de NaOH (0,1 Normal), utilizando para titulación fenoftaleína, mediante el método 942.15/90 de la AOAC (Association of Analytical Communities) (Figura 4-4).



Figura 4-4. Montaje para la determinación de acidez titulable.

#### **4.4.4 Intensidad respiratoria**

Tres frutos por tratamiento se colocaron en tres recipientes cerrados de 450 mL y se almacenaron a 20 °C. Al cabo de dos horas se tomó una muestra de aire de 6 mL del interior de cada recipiente, 3 mL para medir CO<sub>2</sub> expresado en porcentaje y 3 mL para etileno, mediante el cromatógrafo de gases (Trace, Thermo Fisher Scientific, Inc., EE.UU.), equipado con detector de termo conductividad (TCD) y columnas Poropak QS 80/100 (1,2 m x 0,32 cm) y tamiz molecular, 5 A 45/60 (Figura 4-5).



Figura 4-5. Cromatógrafo de gases Modelo Trace; Thermo Fisher Scientific.

#### **4.5 Adquisición de imágenes hiperespectrales para la detección temprana de daños mecánicos.**

En cinco frutos por tratamiento se tomaron tres imágenes, en cada una de las caras golpeadas, para seguir la evolución del golpe. Se aisló la escena de la imagen, mediante una campana de inspección. Para la adquisición de imágenes y controlar sus parámetros fue necesario sincronizar automáticamente los filtros con la cámara, mediante un software desarrollado para este trabajo, en la cámara Monocromática Modelo CoolSnap ES.

Adicionalmente se realizó un experimento únicamente con el tratamiento A, el cual consiste en tomar imágenes hiperespectrales desde el momento del golpe hasta 6

horas después, las imágenes se tomaron cada hora continuamente. Para este ensayo se usaron 20 manzanas golpeadas.

#### **4.5.1 Equipos para la toma de imágenes hiperespectrales.**

##### **➤ Obtención de imágenes en el Infrarrojo.**

Se toman con una cámara hiperespectral NIR (Xenics XEVA-USB 2.0; XenicsVision, Leuven, Bélgica) con un sensor 8.8 x 6.6 mm – 320 x 256 píxeles y un espectrógrafo N17E 2/3", con rango espectral nominal 900 a 1700 nm y resolución espectral nominal de 3,64 nm. La iluminación se controló con una campana con difusor semiesférico de focos halógenos USHIO, modelo Eurostar IR 12 V – 37 W 35° (Figura 4-6).

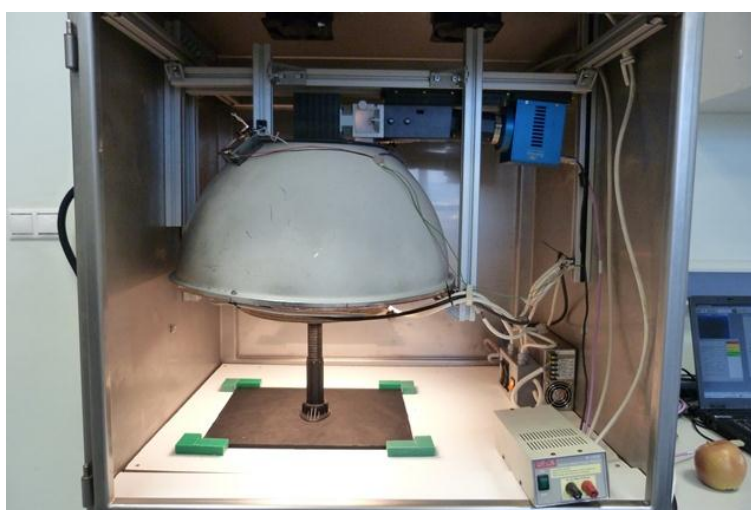


Figura 4-6. Estructura para la cámara hiperespectral NIR Modelo Xenics XEVA.

##### **➤ Obtención de imágenes en el visible-infrarrojo.**

Se utilizó un sistema de adquisición que se compone de dos partes: la primera es una cámara monocromática (Modelo CoolSnap ES; Photometrics®, Tucson, EEUU), con un CCD Sony®ICX285, con formato de matriz de 1392 x 1040 píxeles, con tamaño de píxel de 6,45 x 6,45 µm. La óptica de la cámara es Schneider modelo Xenoplan 1.4/17 mm C-Mount.

Y la segunda parte consta de unos filtros de cristal líquido sintonizables (LCTF Varispec CRI), (VIS-07), con rango espectral de 400 a 720 nm y resolución de 7 nm y (NIR-07), con rango espectral de 650 a 1100 nm y resolución de 7 nm. La iluminación se controló por medio de una campana con difusor semiesférico con focos halógenos Philips A6, modelo Brilliantline 12 V – 20 W 36° (Figura 4-7).

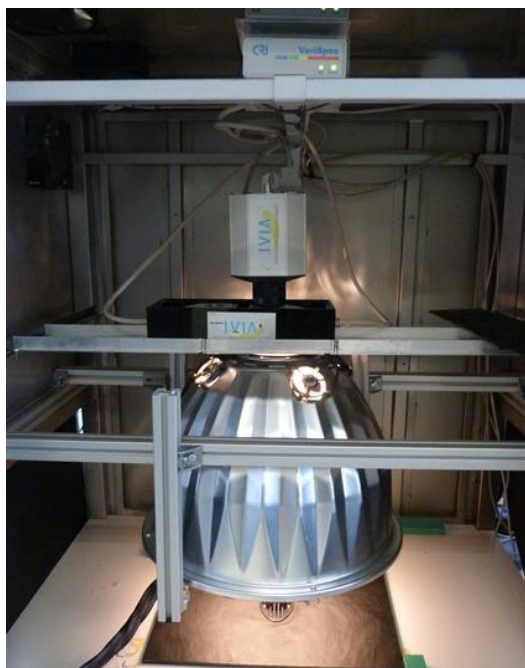


Figura 4-7. Estructura para la cámara hiperespectral Monocromática CoolSnap ES y filtros LCTF.

## **4.6 Longitudes de onda para la detección del daño en manzanas**

### **4.6.1 Procesamiento de las imágenes hiperespectrales**

Para extraer la información de las imágenes espectrales, se hace un preprocesado que elimine los problemas relacionados con la iluminación o la eficiencia espectral y espacial del sistema.

En la corrección por blanco de referencia se empleó un algoritmo de las variaciones espaciales de la intensidad del iluminante con referencia blanca, con la metodología de Gómez-Sanchis (2009). Este procedimiento corrige las

pequeñas variaciones espaciales en la intensidad del iluminante sobre la escena en todas las bandas del hipercubo.

Para esto se utiliza las imágenes espectrales tomadas a la referencia blanca plana (LabSphere calibrada al 99%), y las imágenes espectrales del negro de referencia. A partir de la imagen espectral de la manzana y de la imagen del blanco de referencia y la del negro de referencia se puede obtener la imagen corregida, dividiendo la radiancia absoluta de la manzana entre la radiancia absoluta del blanco de referencia Ecuación 4.1:

$$\rho_{xy}(x, y, \lambda) = \frac{R^{abs}}{R_{blanca}^{abs}} = \rho_{Ref}(\lambda) \times \frac{R(x, y, \lambda) - R_{negra}(x, y, \lambda)}{R_{blanca}(x, y, \lambda) - R_{negra}(x, y, \lambda)} \quad \text{Ec. 4.1}$$

donde,

- $\rho_{Ref}(\lambda)$  la reflectancia promedio de la referencia blanca (99%) en %.
- $R(x, y, \lambda)$  la radiancia de la manzana (en 8 bits con 255 valores equivale al 100%).
- $R_{blanca}(x, y, \lambda)$  la radiancia de la referencia blanca (en 8 bits con 255 valores equivale al 100%).
- $R_{negra}(x, y, \lambda)$  es la radiancia del negro de referencia (en 8 bits con 255 valores equivale al 100%).

Como la corrección por blanco de referencia implica la aplicación en cada pixel, es un proceso que requiere sistematizarse mediante un software capaz de abrir las tres imágenes espectrales (Blanco de referencia, Negro de referencia y la imagen a tratar).

#### 4.6.2 Selección de bandas y creación del conjunto de etiquetado

Para la selección de bandas se creó y se etiquetó un conjunto de entrenamiento donde se analizan visualmente las frutas y se almacena, la información espacial de la región (sana y con golpe) y su reflectancia.



Para crear el conjunto etiquetado de píxeles es necesario abrir cada una de las imágenes y seleccionar manualmente la zona afectada por el golpe y la zona sana. Para esto, se programó una aplicación que cargue las imágenes, y guarde la información de cada pixel.

#### **4.6.3 Reducción de la dimensionalidad de los datos**

##### **➤ Corrección multiplicativa de la dispersión (MSC).**

Con el fin de eliminar el ruido de base y efectos multiplicativos de los datos de las imágenes hiperespectrales, se aplicó el método MSC (Multiplicative Scatter Correction). Al aplicar la MSC para los datos de las dos cámaras (Xenics y la Coolsnap con los dos LCTF) se encuentra cual es la cámara o combinación de filtros, que ofrece un mejor poder predictivo.

##### **➤ Análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA)**

Para reducir la dimensionalidad de los datos de la cámara seleccionada en el MSC, se aplicó el algoritmo PLS-DA, con el que se identificaron las variables latentes (componentes) y se calculó la probabilidad de encontrar un valor específico, si la muestra a la que le corresponde pertenece a la clase (sana o golpeada). También se obtienen los valores VIP (Importancia de la variable para la proyección) para las longitudes de onda de la cámara seleccionada, que indican la contribución total de la longitud de onda al modelo PLS-DA.

#### **4.7 Relación de las imágenes hiperespectrales con los parámetros fisiológicos poscosecha**

Para realizar la relación de los parámetros fisiológicos poscosecha con las imágenes hiperespectrales se intentó buscar los posibles cambios en la respuesta al golpe, es decir, si existe algún pico (máximo o mínimo) en las curvas de evolución de los diferentes parámetros fisiológicos.

Los máximos o mínimos que encuentran en los parámetros fisiológicos, se comparan con las respuestas espectrales de las bandas o longitudes de onda seleccionadas con las técnicas estadísticas mencionadas.

Si existe un valor máximo o mínimo en un parámetro fisiológico y corresponde a un cambio en la respuesta espectral de la longitud de onda seleccionada, se obtendrá la dependencia que existe entre las dos variables, parámetro fisiológico y longitud de onda.

#### **4.8 Análisis estadístico**

Se realizaron los análisis estadísticos con los programas:

- Análisis de varianza multifactorial ANOVA y prueba del Rango múltiple de Duncan, SPSS de IBM Advanced Statistics versión 19 y Statgraphics versión 5.1.
- Análisis de Corrección multiplicativa de la dispersión (MSC) y discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA), SIMCA 13.01 de Umetrics.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Análisis de los momentos donde ocurre daño mecánico por golpe durante la vida poscosecha de la manzana 'Fuji'

Tras la visita realizada a la zona productora de Osso de Cinca y las entrevistas con los productores, se elaboró un esquema de los momentos en que ocurren los daños mecánicos de la manzana 'Fuji' (Figura 5-1).

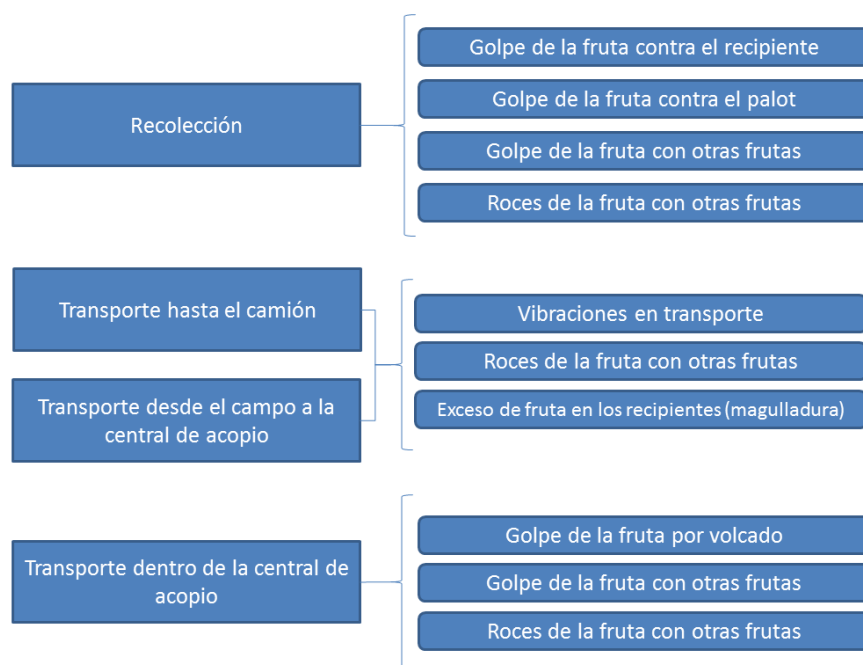


Figura 5-1. Esquema de los momentos en que ocurren daños mecánicos de la manzana 'Fuji'.

Durante el reconocimiento en el campo se encontró que los daños mecánicos se pueden causar en cualquiera de las cuatro etapas del proceso. En el anexo B se detallan los procesos encontrados. En cada una de las etapas se identificó:

- Golpes contra los recipientes (baldes o palots) o contra otras frutas.
- Rozaduras entre las frutas en la recolección y el transporte.
- Vibraciones por efecto del transporte.
- Aplastamiento o magullamiento por el exceso de fruta en los recipientes.

## 5.2 Comportamiento fisiológico poscosecha de manzanas estresadas por daño mecánico.

### 5.2.1 Firmeza

Los resultados de los ensayos se muestran para el texturómetro Instron Universal Testing Machine y el durómetro digital Durofel DFT 100.

#### 5.2.1.1 Firmeza medida con el texturómetro Instron Universal

La evolución de la firmeza en el tratamiento A, (almacenamiento a 4 °C), fue disminuyendo levemente desde el momento del golpe (día 0) hasta el día 6, presentando una pequeña subida en el día 4 respecto a los días anteriores, pero sin pasar el estado inicial del día 0, posiblemente debido a que los frutos golpeados medidos en el día 4 tenían un estado de maduración diferente (Figura 5-2).

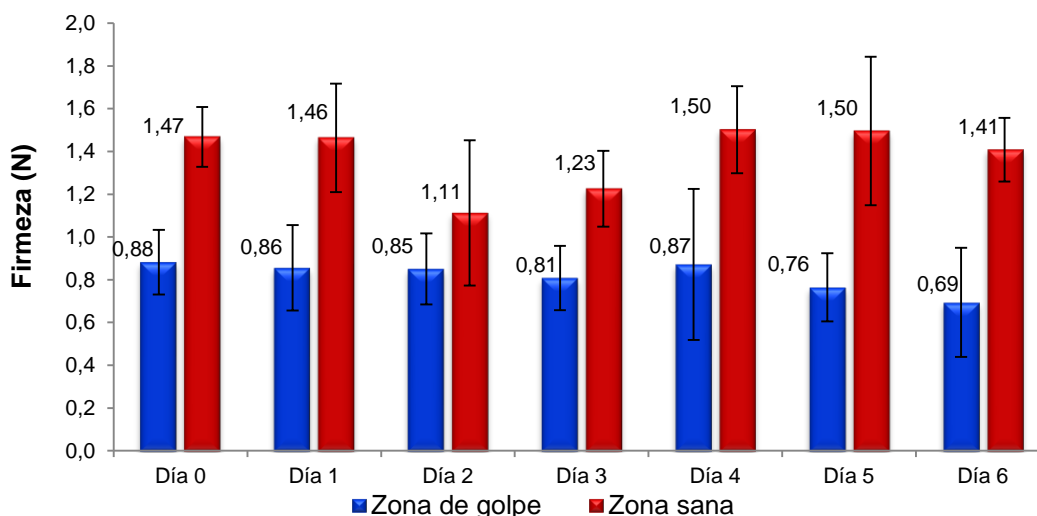


Figura 5-2. Evolución de la firmeza medida con texturómetro Instron para el tratamiento A.

En el día 2 y 3 se presentaron unas caídas en la firmeza en la zona no golpeada, igual que para el día 4 posiblemente los frutos usados en ese día presentaban una

madurez diferente. En general, la evolución que presentó la firmeza en el tratamiento A refleja una pérdida gradual leve, ya que a medida que el tiempo avanza el daño incrementa el ablandamiento por la pérdida de agua en la estructura celular pero no a una velocidad significativa.

El tratamiento B (almacenado 20 °C) no tuvo un comportamiento similar al del tratamiento A. La firmeza registrada en promedio en los días 1, 4 y 5 fue mayor que la firmeza registrada en el día 0, como se observa en la Figura 5-3.

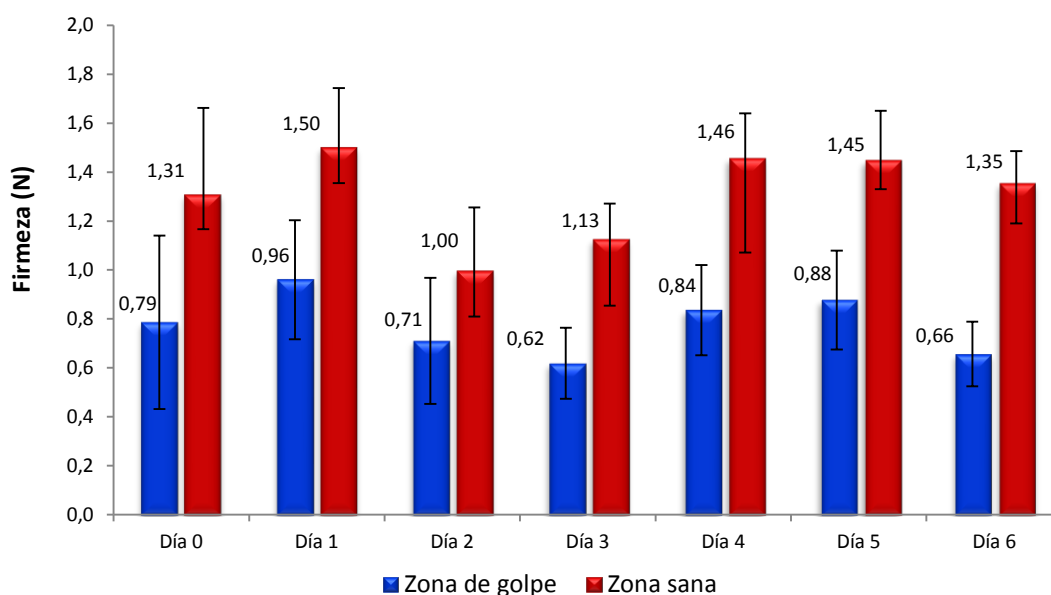


Figura 5-3. Evolución de la firmeza medida con texturómetro Instron para el tratamiento B.

Si bien en este tratamiento no se tiene una tendencia clara de la pérdida de firmeza por el golpe a través del tiempo, sí se evidencia la pérdida de firmeza para cada día respecto al control. La firmeza en los dos tratamientos, en la zona del golpe nunca supero las medidas de firmeza de las zonas sanas siendo más firme en las zonas sanas que en las zonas afectadas por daño mecánico. Se realizó un diagrama de caja para observar la distribución de la firmeza, y así comparar el comportamiento entre los dos tratamientos (Figura 5-4).

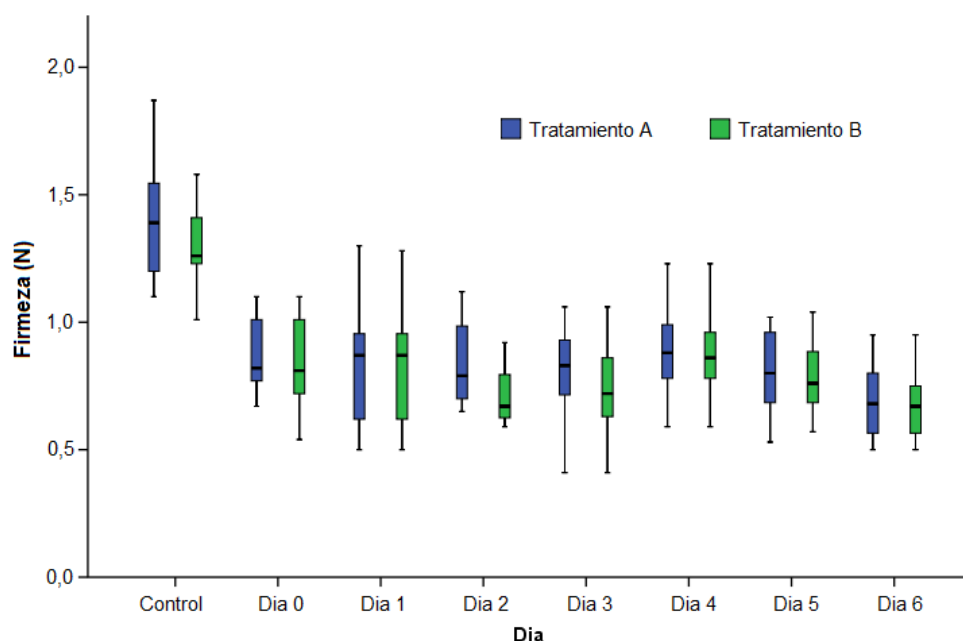


Figura 5-4. Diagrama de Caja para la firmeza medido con Instron para los dos tratamientos.

En la figura 5-4 se observa que no existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre los tratamientos por cada día, comprobado mediante un análisis de varianza multifactorial (ANOVA). Entre la firmeza de los días no existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) a pesar de que la firmeza evoluciona a través del tiempo es decir evoluciona muy lentamente.

Por otra parte, los resultados muestran que la firmeza entre tratamientos no tienen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) lo que indica que la temperatura no tiene efecto en la firmeza de la manzana en la zona del golpe para los días analizados.

#### 5.2.1.2 Firmeza medida con el durómetro Durofel

La firmeza con el durómetro Durofel, ofrece una medida adimensional de 0 a 100. Este instrumento no penetra el producto sino que mide la retracción superficial bajo la acción de una fuerza, de la misma forma que cuando se presiona una fruta con los dedos.

En el tratamiento A, la firmeza en la zona con golpe se fue reduciendo con el paso del tiempo, como muestra la Figura 5-5, aunque en los días 2 y 5 presenta un aumento pero siempre con un valor menor que el valor inicial del día 0, esto puede atribuirse al grado de madurez de la fruta golpeada.

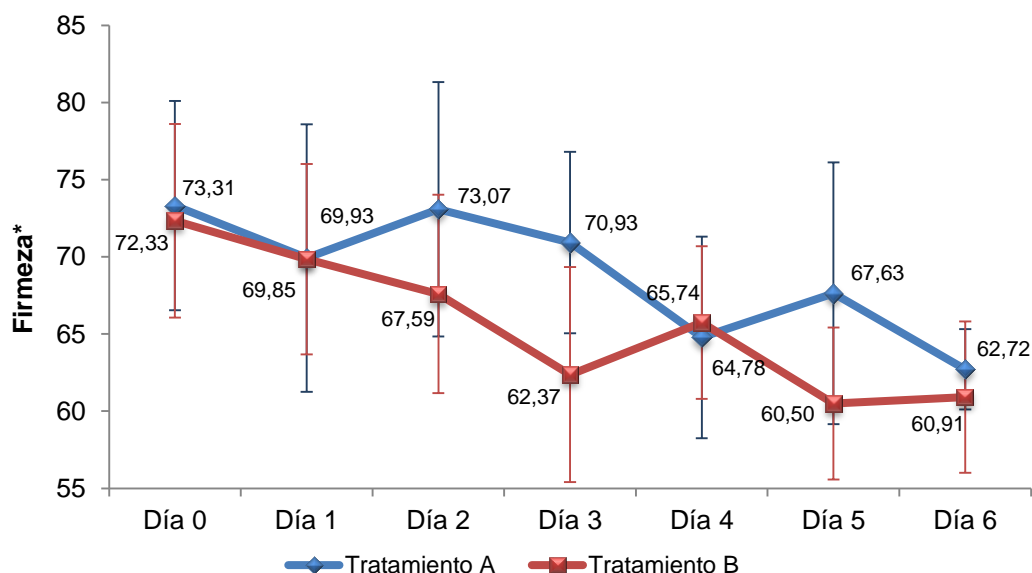


Figura 5-5. Evolución de la firmeza de la zona con golpe medida con el durómetro Durofel para los dos tratamientos. (\*Medida adimensional).

Para el tratamiento B en la zona del golpe, los días 4 y 6 presentan un aumento. Para el tratamiento A y B los valores de la firmeza de la zona sana se mantuvieron en 100. Aparentemente indica que las manzanas no perdieron firmeza con el paso del tiempo.

Se realizó un diagrama de caja para observar la distribución de la firmeza medida con Durofel, y así comparar el comportamiento entre los dos tratamientos (Figura 5-6). Los valores de la firmeza en el tiempo, y firmeza entre tratamientos, indican que no existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), es decir que la temperatura no afecta a la firmeza medida con el Durofel, y que no existe pérdida significativa de firmeza en la zona del golpe a través del tiempo. Al analizar los valores de significancia de la relación firmeza – tratamiento con los dos instrumentos dan medidas similares.

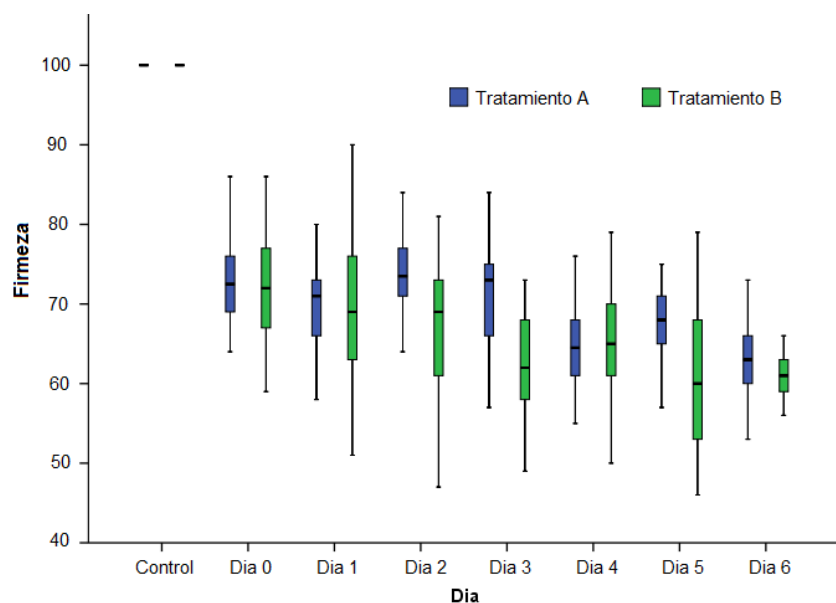


Figura 5-6. Diagrama de caja para la firmeza medido con el durómetro Durofel para los dos tratamientos.

### 5.2.2 Acidez titulable

El ensayo de acidez titulable para los dos tratamientos se realizó empleando zumo de las muestras de las zonas golpeadas y de las zonas sanas. El resultado se da en porcentaje de ácido málico ( $C_4H_6O_5$ ). En la Figura 5-7 se observa la evolución de la acidez titulable para las muestras del tratamiento A.

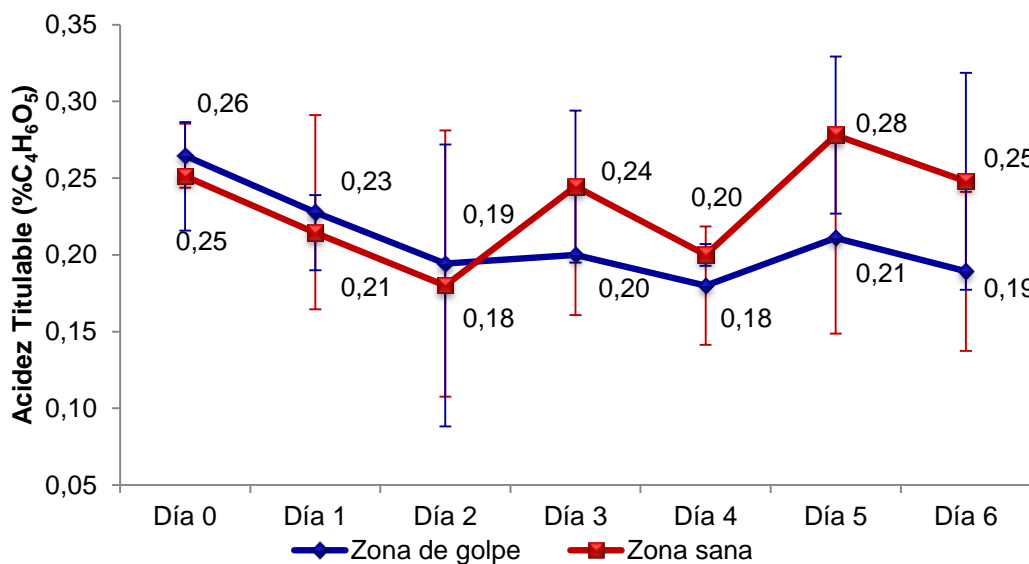


Figura 5-7. Evolución de la acidez en porcentaje de ácido málico para el tratamiento A.



Durante los tres primeros días la acidez de los frutos con golpe disminuye hasta quedar por debajo del valor de la acidez de los frutos sanos, este comportamiento puede ser ocasionado por el desplazamiento del agua en la estructura celular debido al golpe.

La acidez en el tratamiento B, cae por debajo de la media de los frutos sanos a partir del día 2 (Figura 5-8) más rápido que en el tratamiento A, lo que puede deberse a la pérdida de agua. Esta pérdida de agua produce que la zona del golpe se quede más seca y con una textura similar a la del corcho. Por otra parte, se observó un pardeamiento en esta zona. Por ello, la extracción del zumo a partir del segundo día se hizo más difícil por la poca presencia de agua.

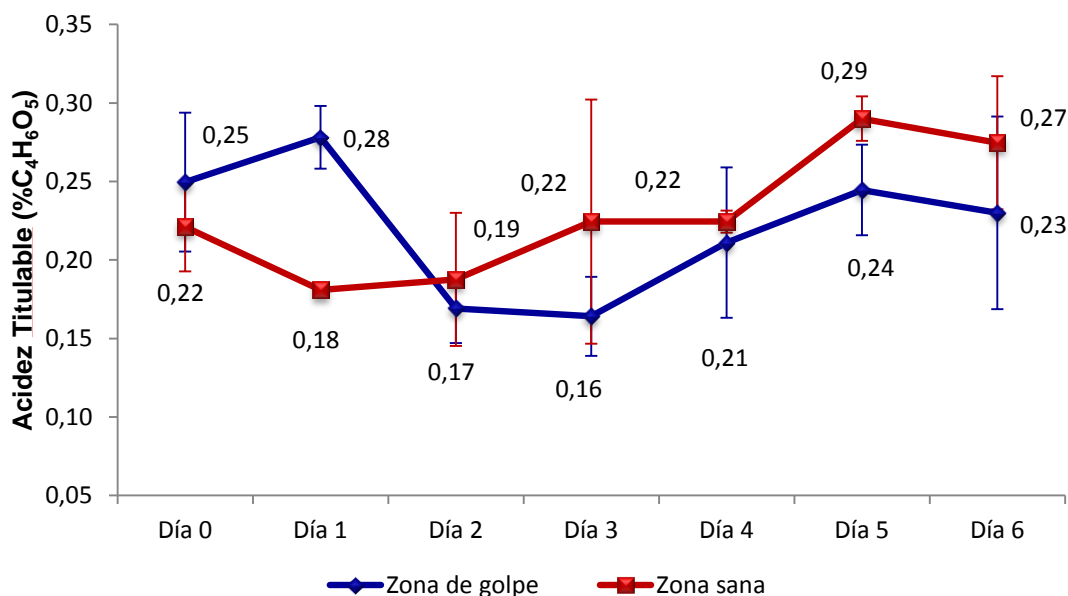


Figura 5-8. Evolución de la acidez en porcentaje de ácido málico para el tratamiento B.

En la figura 5-9 se observa el pardeamiento que toma las muestras en la zona del golpe, a partir del día 2 empieza a cambiar la estructura celular formándose una zona con resequedad que forma una estructura acorchada.

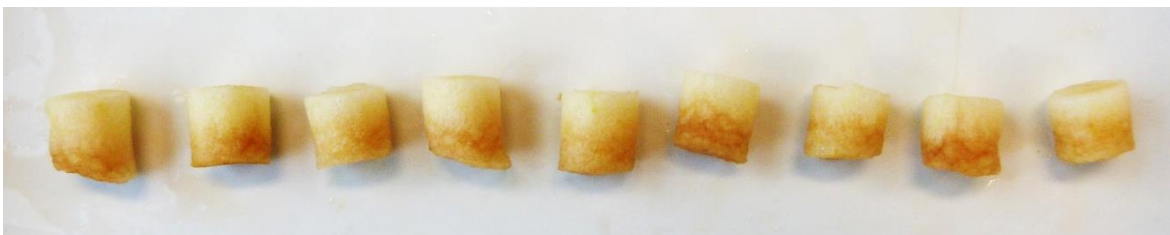


Figura 5-9. Muestras de manzana 'Fuji' de la zona del golpe para los ensayos de acidez y sólidos solubles totales.

El diagrama de caja para observar la evolución en el porcentaje de ácido málico presente en las manzanas 'Fuji', comparando el comportamiento entre los dos tratamientos (Figura 5-10) muestra que para la acidez no existieron casos atípicos. Los valores encontrados se agruparon en un rango cercano a la media de cada día. Para comparar si existen diferencias significativas se realizó un análisis de varianza multifactorial.

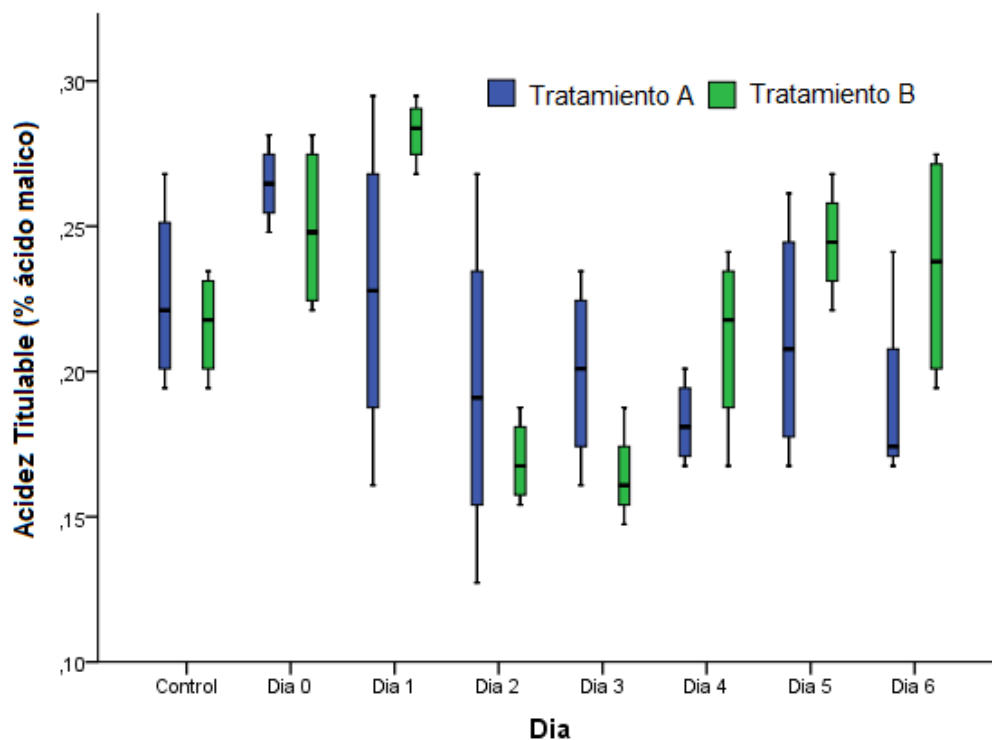


Figura 5-10. Evolución de la acidez en porcentaje de ácido málico para los dos tratamientos.

Los valores de significancia obtenidos indican que existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ); es decir, que la acidez cambia con el tiempo. La acidez entre

tratamientos indica que no existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) lo que muestra que la temperatura no tuvo efecto en la evolución de la acidez en la zona del golpe. Es necesario tener en cuenta que la pérdida de humedad puede influir en este parámetro.

### 5.2.3 Sólidos solubles totales

Los ensayos de sólidos solubles totales (SST) se realizaron utilizando zumo de las zonas con golpe y sanas, el resultado se expresó en grados Brix. La Figura 5-11 muestra la evolución de los sólidos solubles totales del tratamiento A, el cual tuvo una tendencia irregular a lo largo del tiempo, presentando un pico importante el día 2 que también se observó en las muestras de las zonas sanas.

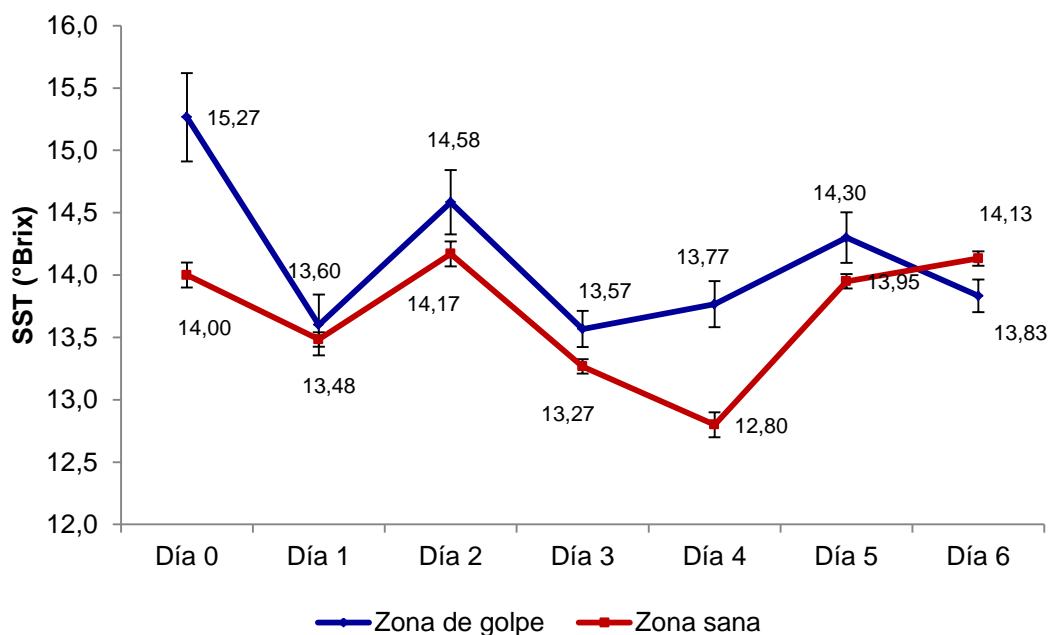


Figura 5-11. Evolución de los sólidos solubles totales (SST), para el tratamiento A.

El tratamiento B se comportó de manera inversa al tratamiento A. Como se muestra en la Figura 5-12, en las muestras de las zonas sanas, el contenido en SST estuvo por encima de los valores de la zona del golpe, lo que pudo deberse a que la temperatura de 20 °C ocasionó una maduración más rápida.

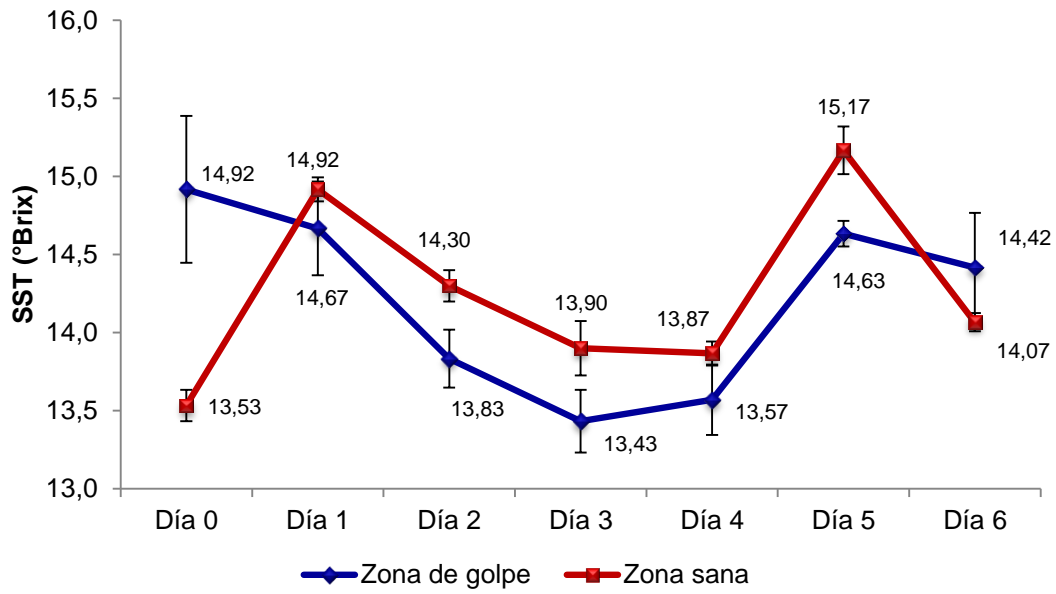


Figura 5-12. Evolución de los sólidos solubles totales (SST), para el tratamiento B.

Al observar el comportamiento de los SST de la Figura 5-13, se encontró que, en general, los valores se concentran alrededor de la media, es decir, que no hay una gran dispersión de los datos con excepción de los días 1 y 3 del tratamiento B.

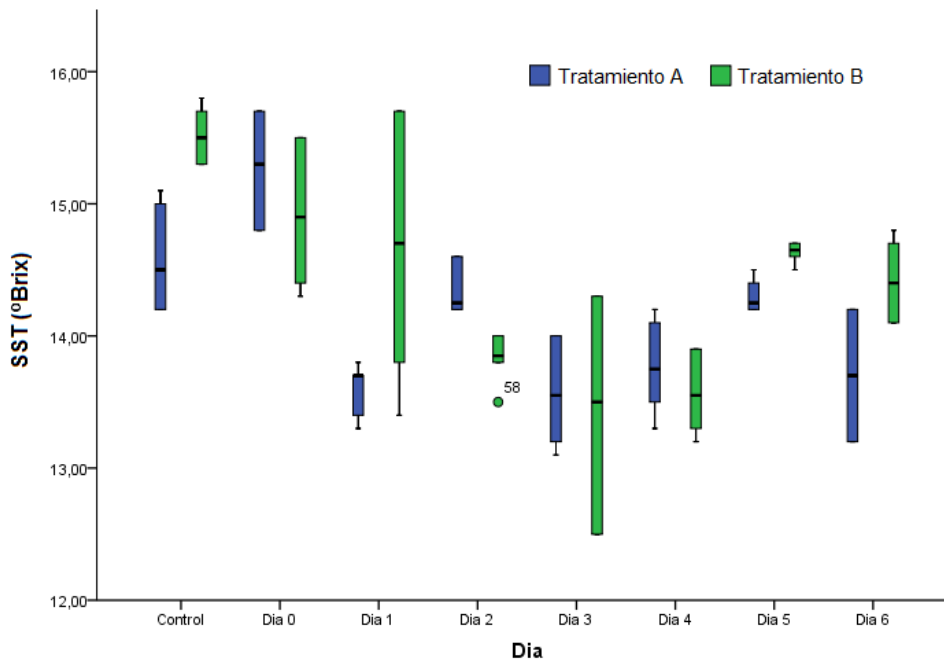


Figura 5-13. Diagrama de caja de los sólidos solubles totales (SST) para los dos tratamientos.

En los dos tratamientos se presenta un leve aumento de las medias en el día 5, con lo cual, se le puede atribuir a la presencia de la zona acorchada. Se realizó un ANOVA para verificar las diferencias entre las variables. Los resultados indican que existes diferencias entre los SST medidos en diferentes días lo que se puede asociar al hecho de que el golpe produce un aumento en la producción de azúcares. Además, los valores de significancia entre los SST y los tratamientos indican que existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ), lo que viene a demostrar que la temperatura influye en la evolución de los SST.

#### 5.2.4 Ensayos de respiración, dióxido de carbono y etileno

Los resultados para este ensayo se expresan en porcentaje de CO<sub>2</sub> y el etileno en  $\mu\text{L kg}^{-1}\text{h}^{-1}$ . La medida de control se tomó como un dato de entrada (Día E), es decir, se midió el porcentaje de CO<sub>2</sub> y el etileno antes de golpear las manzanas.

##### 5.2.4.1 Evolución del porcentaje de dióxido de carbono

Se observa en la Figura 5-14 la evolución del porcentaje de CO<sub>2</sub> para cada tratamiento. En el tratamiento A, se presentá un pico de producción de CO<sub>2</sub> en el día 1, después disminuye hasta un valor menor que el de los frutos sanos.

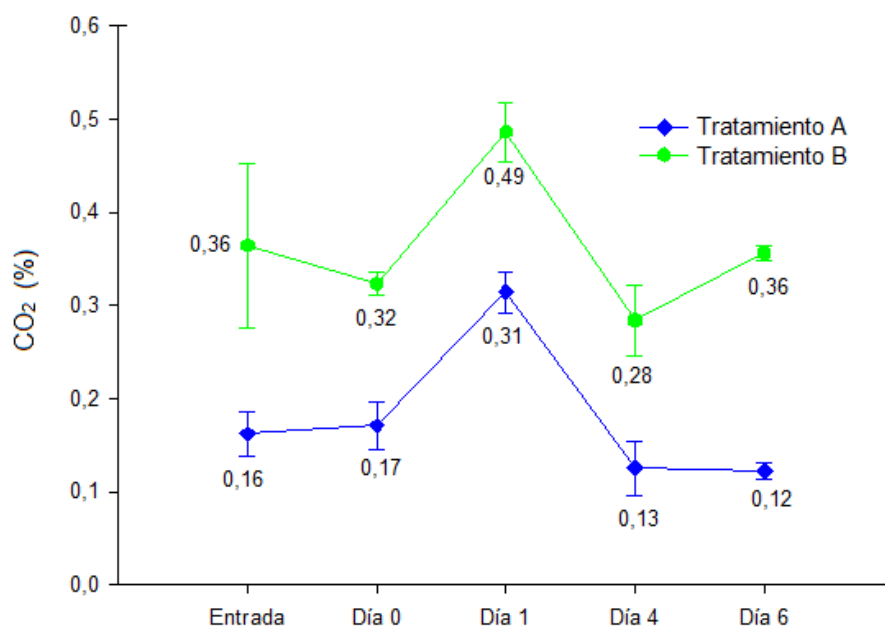


Figura 5-14. Evolución del CO<sub>2</sub> para los dos tratamientos.

El tratamiento B presentó el mismo comportamiento, un aumento de producción de  $\text{CO}_2$  en el día 1 y una posterior disminución hasta la medida de control. Al observar la figura 5-14 los valores hallados para el tratamiento A son inferiores los encontrados para el tratamiento B, con lo cual se evidencia que la temperatura influye en la producción de  $\text{CO}_2$ .

#### 5.2.4.2 Evolución del etileno

La Figura 5-15 ilustra la evolución del etileno para los tratamientos. Se observa una disminución gradual en los dos casos.

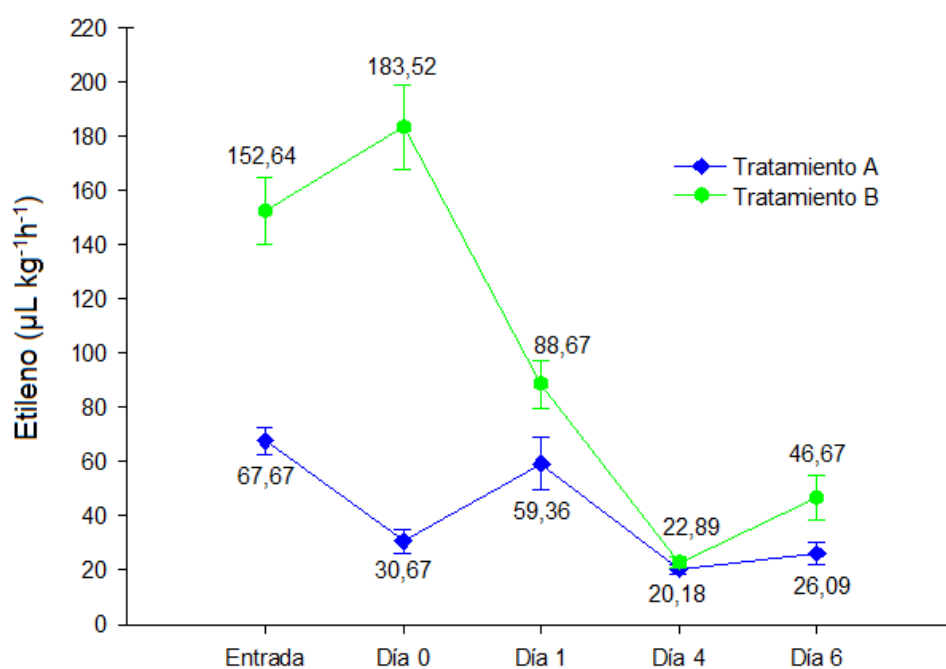


Figura 5-15. Evolución del Etileno ( $\mu\text{L kg}^{-1}\text{h}^{-1}$ ) para los dos tratamientos.

El tratamiento B presenta mayores tasas de desprendimiento de Etileno probablemente debido al almacenamiento a una mayor temperatura. Ambos tratamientos registraron el menor valor de etileno en el día 4, presentando un ligero incremento al final del experimento.

### 5.3 Adquisición de imágenes hiperespectrales para la detección temprana de daños mecánicos

#### ➤ Software para la adquisición de Imágenes Hiperespectrales:

Como resultado de este trabajo se desarrolló el software para la adquisición de las imágenes hiperespectrales. El equipo empleado para adquirir estas imágenes es complejo y únicamente se puede gobernar a través de una interfaz proporcionada por el fabricante que no permite la personalización del equipo según las necesidades del experimento.

Por ello fue necesario desarrollar una aplicación que permite controlar la cámara y los filtros. Esta aplicación tiene las siguientes características:

- ✓ Reconocer el hardware conectado al computador (los filtros sintonizables y la cámara) y establecer comunicación entre ellos y el sistema.
- ✓ Visualizar las imágenes en pantalla adquiridas con el equipo hiperespectral.
- ✓ Adquirir imágenes en una longitud de onda fijada ya sea en la zona visible del espectro electromagnético o en la zona del infrarrojo cercano, con tiempos de integración<sup>1</sup> fijos o establecidos previamente durante la calibración del equipo.
- ✓ Hacer un barrido en el rango del espectro de cualquiera de los dos LCTF, adquiriendo imágenes de la zona seleccionada, ya sea con tiempos de integración fijos o cargados de una calibración previa.
- ✓ Adquirir únicamente una región de interés (ROI) de la escena.
- ✓ Realizar una calibración del tiempo de integración de cada longitud de onda para asegurar que los resultados son independientes de la iluminación empleada y de la sensibilidad del sistema a cada longitud de onda.
- ✓ Guardar las imágenes hiperespectrales como un conjunto de imágenes monocromáticas en formato bitmap (BMP), de forma que se puedan abrir con un programa estándar de edición de imagen.

---

<sup>1</sup> Tiempo de integración: es el tiempo durante el cual los píxeles están acumulando luz, a través de la apertura del diafragma de la cámara. Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1maras\\_color](http://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1maras_color)

- ✓ Guardar las imágenes hiperespectrales en formato BSQ para su posterior análisis con programas especializados en este tipo de imágenes, como por ejemplo el ENVI (Exelis Visual Information Solutions, EE.UU).

Todos los algoritmos creados se han integrado en una única aplicación informática que controlan los filtros y la cámara, y que permite adquirir las imágenes de forma adecuada, sistemática y continua. Esta aplicación se denominó Fruitspectro y sus funciones se ilustran en la Figura 5-16. La descripción del software se muestra en el anexo C.

## **5.4 Análisis de las imágenes hiperespectrales**

### **5.4.1 Corrección por referencia blanca**

La corrección por referencia blanca se hizo mediante una aplicación en MatLab denominada BWCorrection, la descripción se encuentra en el anexo D, y entrega una imagen corregida de las variaciones espaciales de la intensidad del iluminante por medio de la referencia blanca.

### **5.4.2 Creación del conjunto etiquetado de datos**

Debido a que el método de análisis estadístico usado es supervisado, es necesario seleccionar de forma manual un conjunto representativo de píxeles para cada una de las clases del problema (zona sana y zona golpeada). Realizar esta tarea en una imagen hiperespectral es, por su complejidad, un trabajo complicado y lento. Por ello, se programó una aplicación específica para realizar esta tarea. Es un asistente a la creación del conjunto de etiquetado desarrollada en MatLab.

En el anexo E se describe cada una de las funciones de esta aplicación. Este programa permite etiquetar un conjunto de píxeles como perteneciente a una u otra clase simplemente seleccionándolo como una ROI en una imagen del hipercubo.



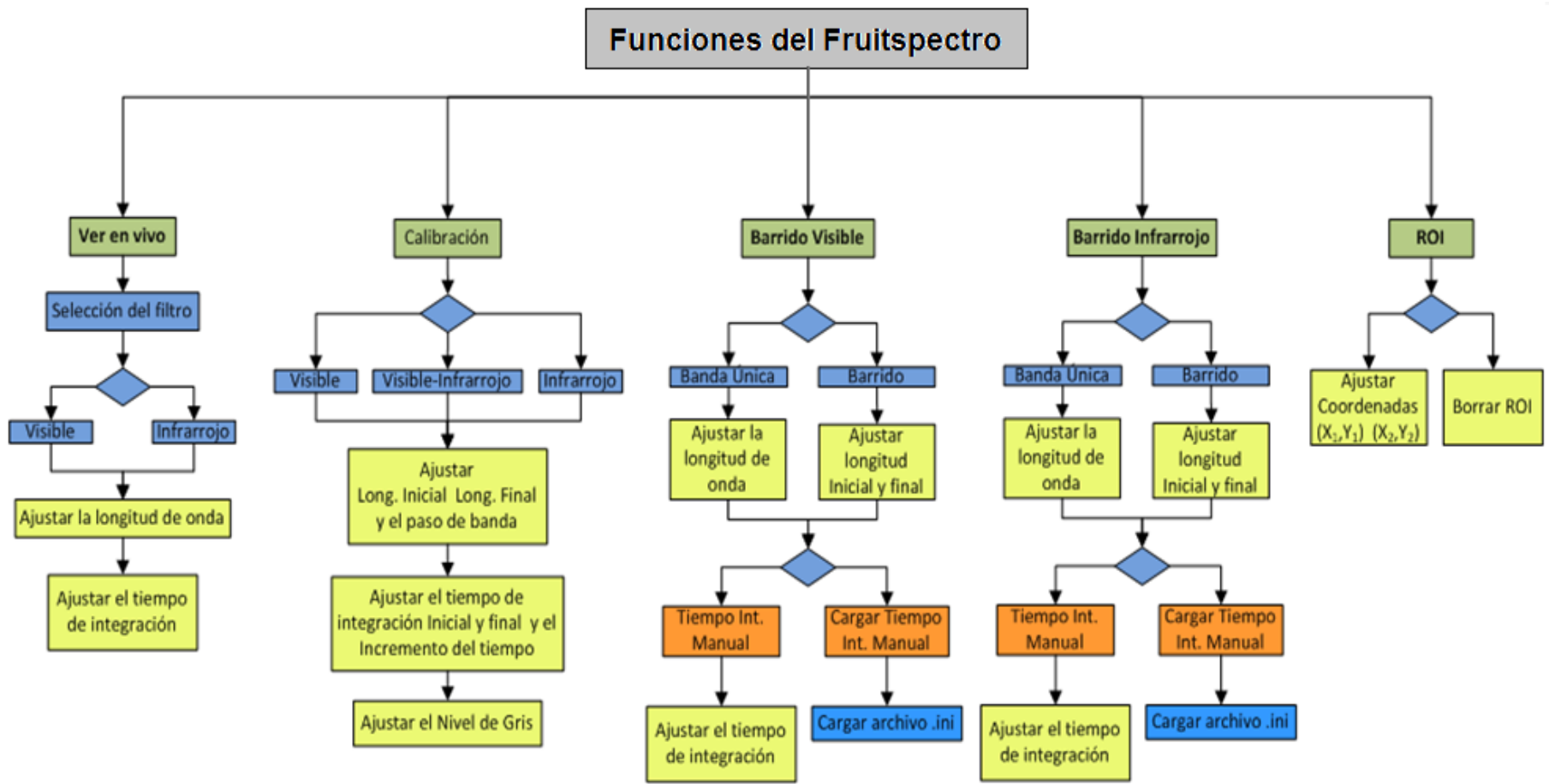


Figura 5-16. Esquema de las funciones del software Fruitspectro.

Finalmente la aplicación almacena toda la información relativa a las regiones seleccionadas, el valor de los niveles de reflectancia de cada pixel y la clase a la que pertenecen para que se puedan utilizar de entrada en el modelo estadístico.

En la Figura 5-17 se ilustra la interfaz de usuario en el proceso de selección de las zonas con golpe (en rojo) y las zonas sanas (en verde).

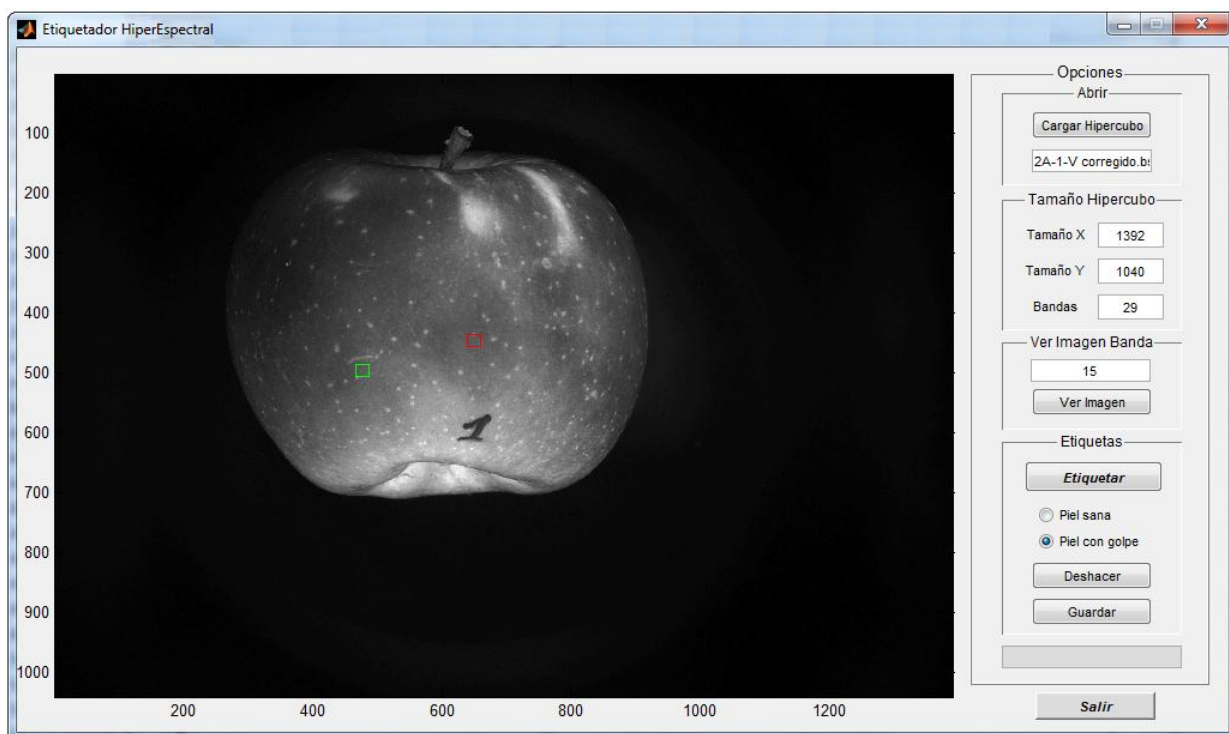


Figura 5-17. Proceso de etiquetado de una manzana, zona con golpe en rojo, y la zona sana en verde.

#### 5.4.3 Selección del rango espectral

En la selección del rango espectral se identificó la región del espectro que nos ofrece información más relevante. En primer lugar se obtuvo el valor predictivo de cada sistema espectral empleado con el objetivo de seleccionar cuál es el más idóneo para detectar los daños en las manzanas de forma temprana.

Se aplicó una MSC eliminando los ruidos de base y efectos multiplicativos a los datos obtenidos con cada cámara y para todos los experimentos. El resultado se

muestra en la Tabla 5-1, e indican que para medir la evolución del daño en las horas siguientes a producirse el golpe la cámara LCTF-NIR y la cámara Xenics son equivalentes.

Tabla 5-1. Valor predictivo para cada rango espectral

Experimento	Rango espectral	Valor de Predicción	Intervalo inferior	Intervalo superior	PC's
Seis Horas	LCTF-VIS (460 – 700 nm)	55,3	48,85	50,75	12
	LCTF-NIR (680-1020 nm)	62,1	56,78	67,41	4
	Xenics (962-1500 nm)	66,3	61,12	71,48	4
Tratamiento A	LCTF-VIS (460 – 700 nm)	47,1	41,63	52,57	5
	LCTF-NIR (680-1020 nm)	65,3	60,08	70,51	6
	Xenics (962-1500 nm)	75,5	70,79	80,21	1
Tratamiento B	LCTF-VIS (460 – 700 nm)	57,1	51,68	62,52	5
	LCTF-NIR (680-1020 nm)	64,3	59,05	69,55	10
	Xenics (962-1500 nm)	73,7	68,89	78,52	2

Para la evolución del daño en los días posteriores a producirse el golpe, en el tratamiento A la cámara Xenics ofrece un intervalo de confianza (95%) con un poder predictivo superior al resto, así como un menor número de variables latentes necesarias (este sistema ofrece un modelo mucho más robusto, ya que sólo necesita una componente frente a las seis que necesita el sistema basado en LCTF). En cuanto al tratamiento B, aunque se solapan los intervalos de confianza, de nuevo el modelo obtenido con la cámara Xenics es mucho más robusto. En el experimento de las seis horas la cámara Xenics fue la que obtuvo un mayor valor de predicción, por lo que los resultados se ofrecen únicamente para esta cámara y su rango espectral.

#### 5.4.3.1 Reducción de la dimensionalidad de los datos para el experimento de 6 horas continuas.

Para la reducción de la dimensionalidad se utilizó un PLS-DA que parte de realizar un modelo PLS para reducir la dimensión de los datos y establecer las fronteras

entre las clases. Luego se hace un análisis discriminante que clasifica las nuevas muestras según el modelo confeccionado. En este trabajo, tras realizar una eliminación progresiva de datos anómalos y correcciones a los mismos, se ha llegado a un modelo PLS-DA con un poder predictivo teórico del 66,3%. Este modelo no presenta un número de valores anómalos fuera del rango esperado en el estadístico DModX RSS (Figura 5-18) por encima del esperado de manera aproximada, y nunca con valores extremadamente altos.

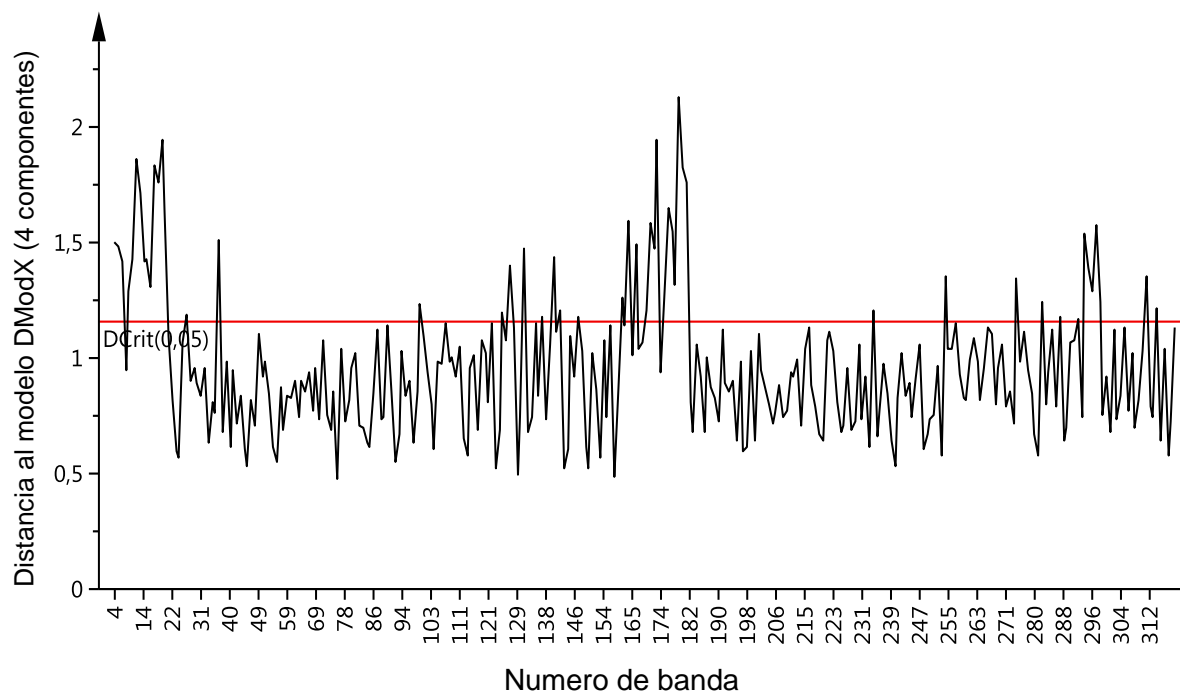


Figura 5-18. Gráfico de distancias al modelo ModX [4 Componentes] (PLS-DA), Cámara Xenics para el experimento de seis horas.

Hay que resaltar que para modelos previos asociados a todas las observaciones, la existencia de datos influyentes (elevados valores en determinadas componentes) forzaba a la existencia de dichas componentes, resultando modelos poco robustos (y sobreajustados) de entre 6 y 12 componentes. Al enfrentar las componentes de los modelos seleccionados de los experimentos, se obtiene la gráfica Score-plot, en la que se muestra el ovalo de confianza en el cual debe estar el 95% de las puntuaciones de las componentes para que el modelo sea confiable.

Las Figuras 5-19 y 5-20 muestran los gráficos de los *scores* para el componente 1 frente al 2 y el componente 3 frente al 4 del experimento de las seis horas, el 95% de las puntuaciones de las componentes están dentro del ovalo de confianza.

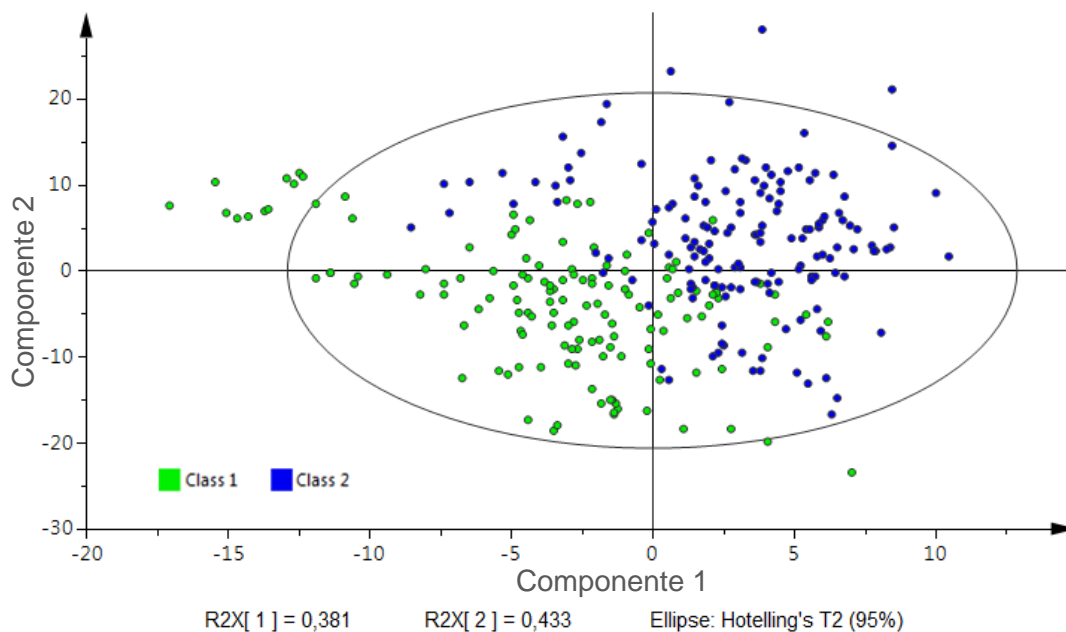


Figura 5-19. PLS-DA *Score Plot*, componente 1 frente a 2 para la cámara Xenics  
Colored according to clases.

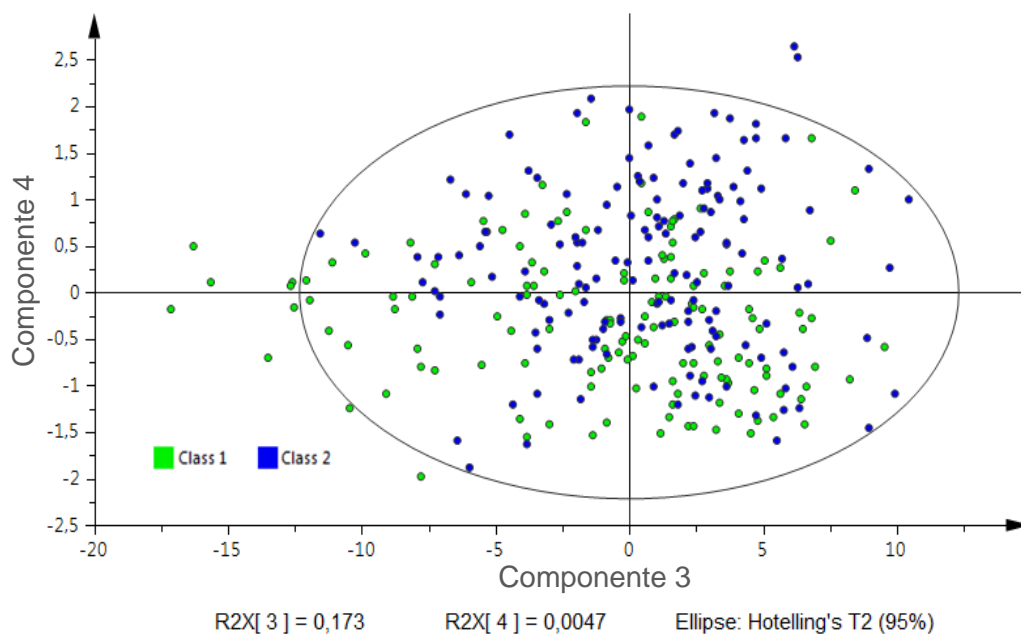


Figura 5-20 PLS-DA *Score Plot*, componente 3 frente a 4 para la cámara Xenics  
Colored according to clases.

Los valores VIP (Importancia de la variable para la proyección) resumen la contribución total de cada variable X (en nuestro caso cada longitud de onda) al modelo PLS. Las variables con un mayor poder de discriminación para el modelo elegido, según la lista de importancia del modelo (VIP) son las que aparecen en la Figura 5-21.

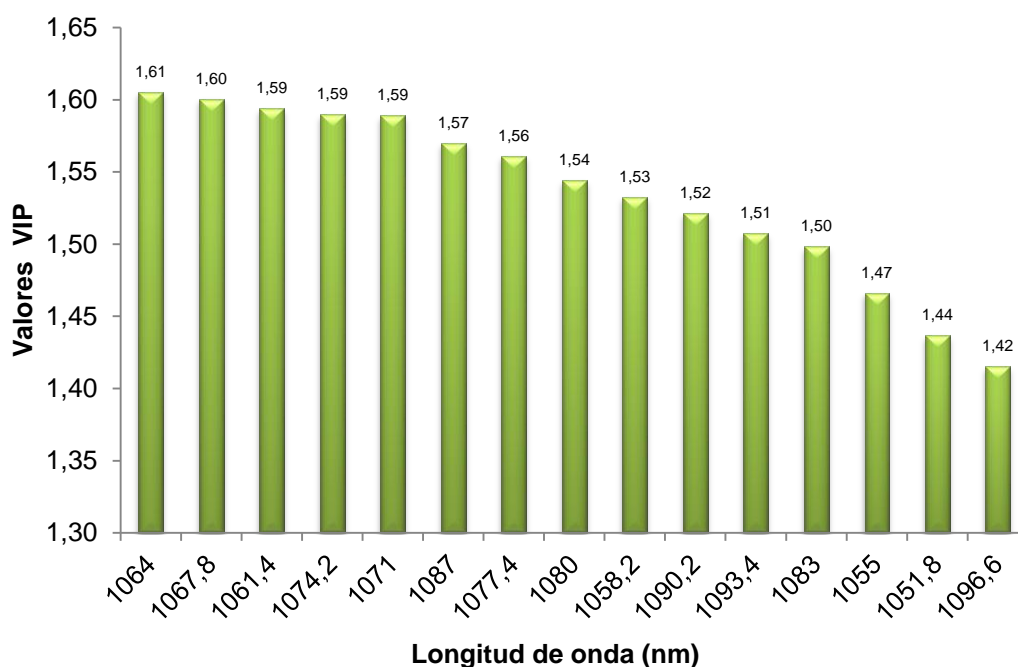


Figura 5-21 Longitudes de onda con mayor poder de discriminación para experimento de 6 horas continuas.

Con el fin de determinar el tipo de relación de las bandas espectrales con las dos clases a analizar (Clase Sana y Clase Golpeada), se adjunta el gráfico  $w^*c$  (Figura 5-22) para la primera variable latente, cuyos pesos (en valor absoluto) no tienen por qué coincidir necesariamente con el orden de los VIP.

En este gráfico se observan las longitudes de onda en el eje X frente al peso de dichas longitudes de onda en la primera componente. Las que más se alejan del valor cero corresponden con aquellas que más importancia tienen en el modelo.

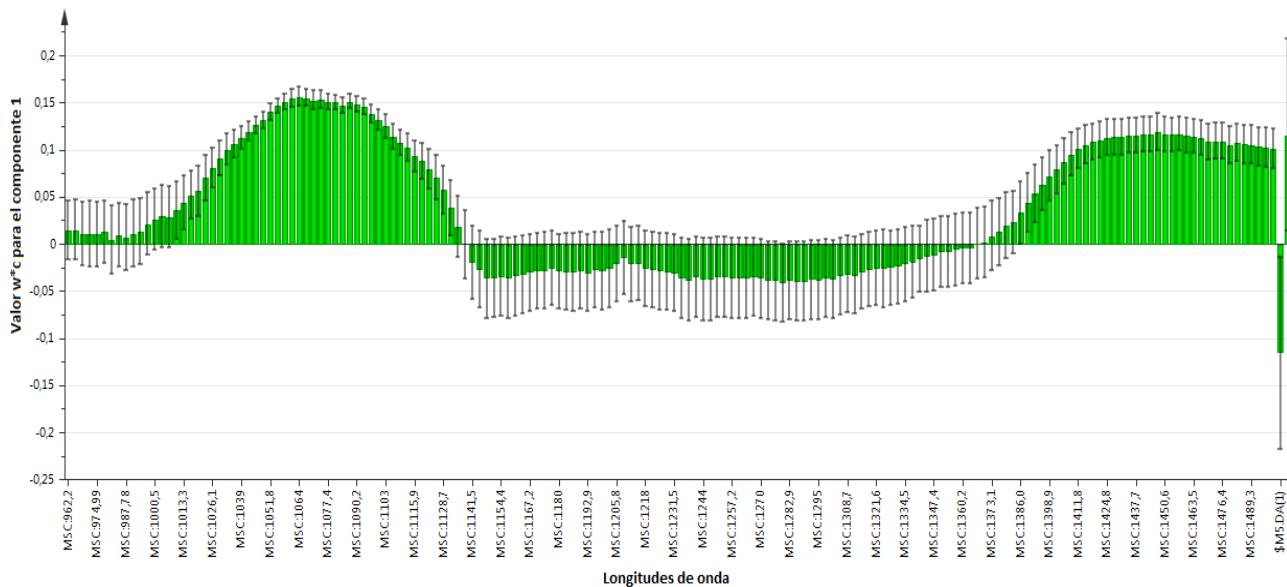


Figura 5-22. Gráfico  $w^*c$  para la primera variable latente o componente 1 en el experimento de las seis horas – componente 1, cámara Xenics.

#### 5.4.3.2 Clasificación de los datos en grupos mutuamente excluyentes para el experimento de 6 horas continuas

El análisis de la varianza de los factores tiempo y clase (Tabla 5-2) muestra que el efecto del tiempo no es significativo en la clasificación de la fruta ( $p < 0,05$ ) y por lo tanto no se van a encontrar diferencias relacionadas con la evolución del daño a lo largo del tiempo.

Tabla 5-2. Resultado del análisis de la varianza para los factores tiempo y clase.

Fuentes	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media del cuadrado	F-Ratio	P-Valor
Efectos principales					
A: Tiempo	0,009375	7	0,00133929	2,14	0,1680
B: Tipo	0,005625	1	0,00562500	9	0,0199
RESIDUAL	0,004375	7	0,00062500		
TOTAL (Corregido)	0,019375	15			

La explicación que se encuentra es que, si bien las diferencias entre las zonas con lesión mecánica y las zonas sanas de las manzanas aumentan para cada manzana de forma individual, tal y como se puede apreciar en la Figura 5-23, en conjunto las manzanas maduran de forma diferente, lo que tiene una gran

influencia en esta evolución y hace que no sea posible establecer un umbral o una función de discriminación válida para todas.

En este gráfico se puede apreciar como el promedio de las diferencias entre las zonas golpeadas y sanas dentro de la misma manzana aumentan conforme avanza el tiempo, aunque esto no garantiza que entre diferentes manzanas se puedan establecer umbrales tan claros ya que no se encontró significancia con el ANOVA. Esto es debido a la variabilidad existente entre manzanas, que pasa a la varianza residual, al no poder controlarse el tipo de manzana con el que se encuentra el modelo de clasificación cada vez.

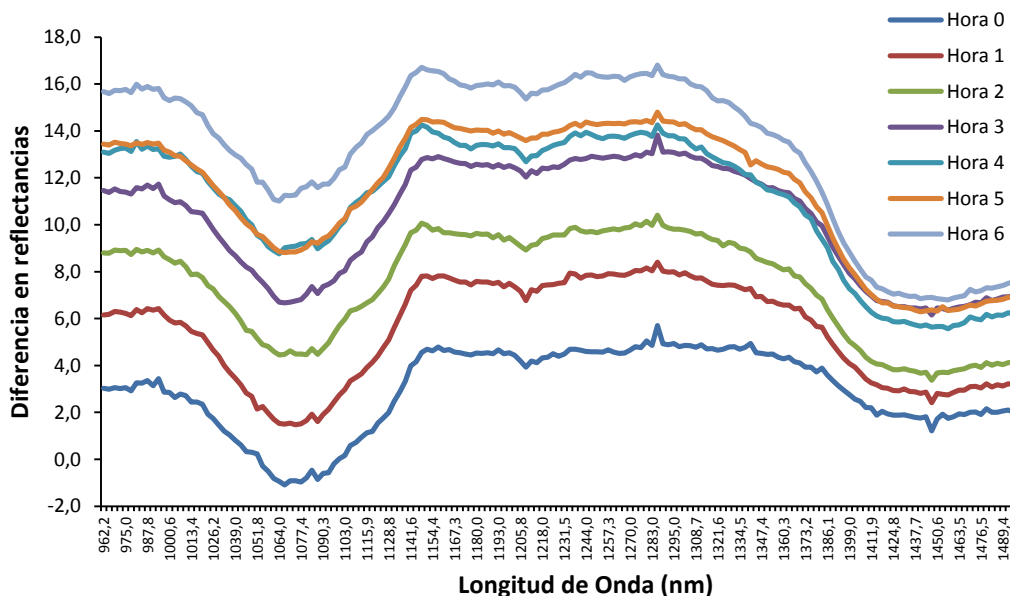


Figura 5-23. Diferencias promedio entre los espectros de las zonas sana y golpeada.

Sin embargo, los resultados obtenidos en cuanto a la detección de la zona golpeada son esperanzadores, especialmente teniendo en cuenta que los daños no son diferenciables a simple vista y se pueden detectar desde el primer momento, esto es, nada más se produce el daño, lo que abre la puerta a el desarrollo de dispositivos que potencialmente podrían detectar los daños ocasionados a la fruta incluso por las mismas líneas de clasificación.



La Tabla 5-3 muestra la matriz de confusión obtenida para la clasificación de la fruta como sana o golpeada empleando PLS-DA. Se observa que del 100% de los pixeles sanos, el modelo clasifica el 89% correctamente, el 11% restante son clasificado como golpeados siendo estos falsos positivos, mientras que del 100% de los pixeles golpeados, el modelo clasifica el 85% acertadamente y el 15% restante lo clasifica como pixel sano.

Tabla 5-3 Matriz de confusión para el experimento de 6 horas continuas.

<i>Predicho\Real</i>	Sana	Golpeada
Sana	89%	11%
Golpeada	15%	85%

#### 5.4.3.3 Reducción de la dimensionalidad de los datos para los tratamientos A y B

Al igual que para el caso de las seis horas, tras realizar una eliminación progresiva de datos anómalos, se ha llegado a un modelo PLS-DA con un poder predictivo teórico del 75,5%. Este modelo no presenta valores anómalos fuera del rango esperado en el estadístico DModX RSS, (Figura 5-24 para el tratamiento A y Figura 5-25 para el tratamiento B).

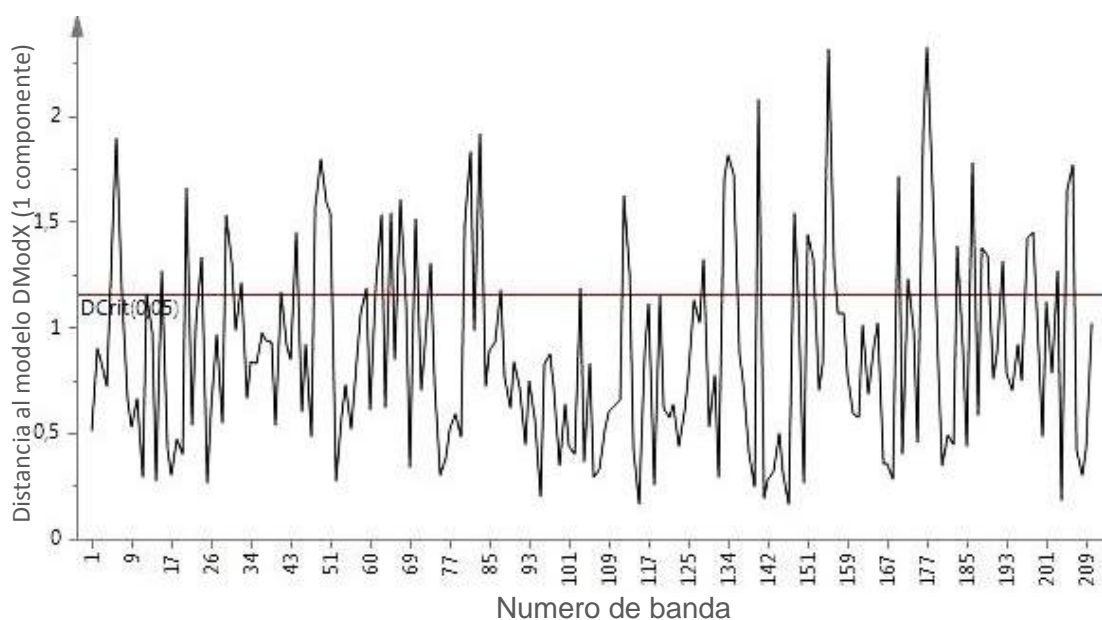


Figura 5-24. Gráfico de distancias al modelo ModX [1 componente] (PLS-DA), Cámara Xenics para el tratamiento A.

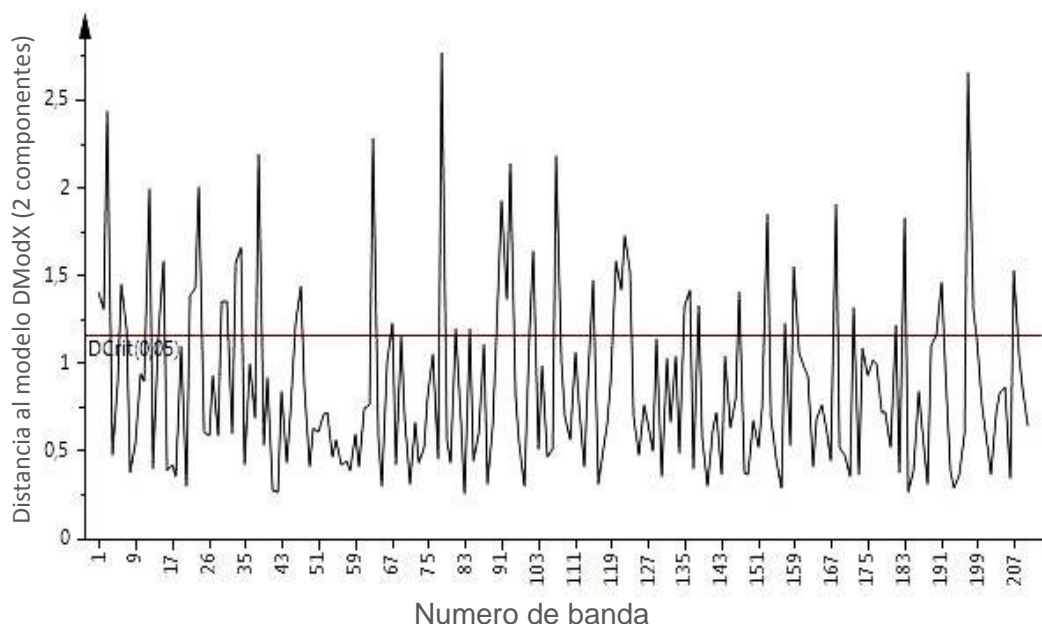


Figura 5-25. Gráfico de distancias al modelo ModX [2 Componentes] (PLS-DA), Cámara Xenics para el tratamiento B.

Para el tratamiento A se encontró que con solo una componente se puede representar toda la variabilidad del modelo. Con el fin de determinar el tipo de relación de las bandas espectrales con las dos clases a analizar (Clase Sana y Clase Golpeada), se adjunta el gráfico  $w \cdot c$  (Figura 5-26) para la primera variable latente del tratamiento, cuyos pesos (en valor absoluto) no tienen por qué coincidir necesariamente con el orden de los VIP.

En la Figura 5-26 se observan las longitudes de onda en el eje X frente al peso de dichas longitudes de onda en la primera componente. Las que más se alejan del valor cero corresponden con aquellas que más importancia tienen en el modelo.

La Figura 5-27 muestra el gráfico de los *scores* para el componente 1 frente al 2, del tratamiento B que con dos componentes se puede representar toda la variabilidad del modelo debido a su distribución.

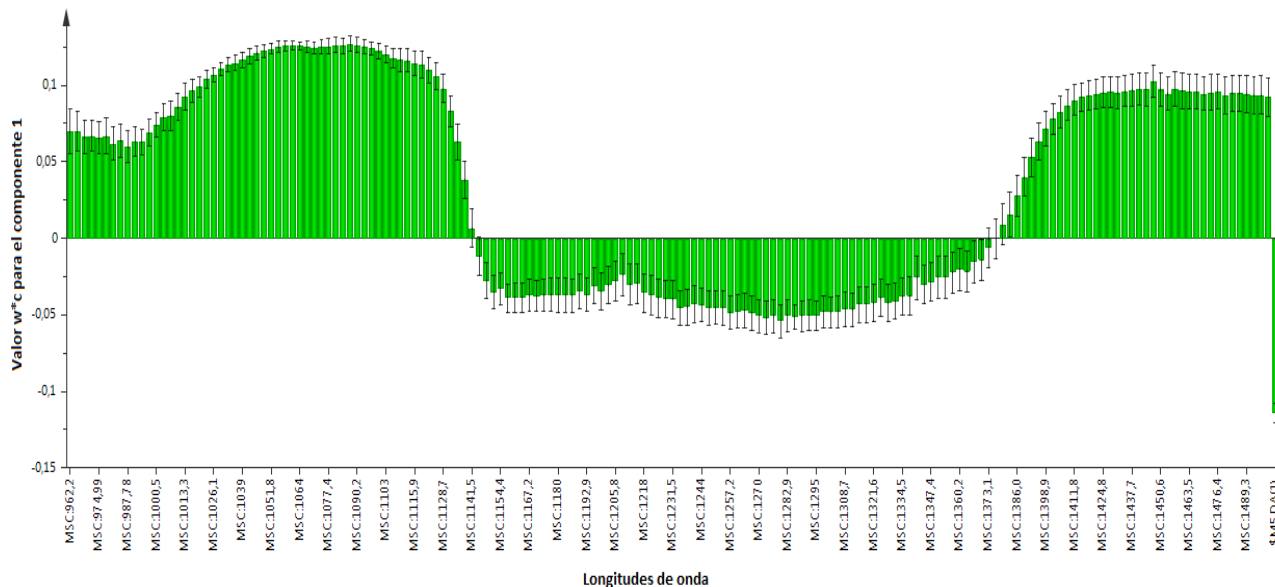


Figura 5-26. Gráfico  $w \cdot c$  para la primera variable latente o componente 1 para el Tratamiento A (PLS-DA), Cámara Xenics.

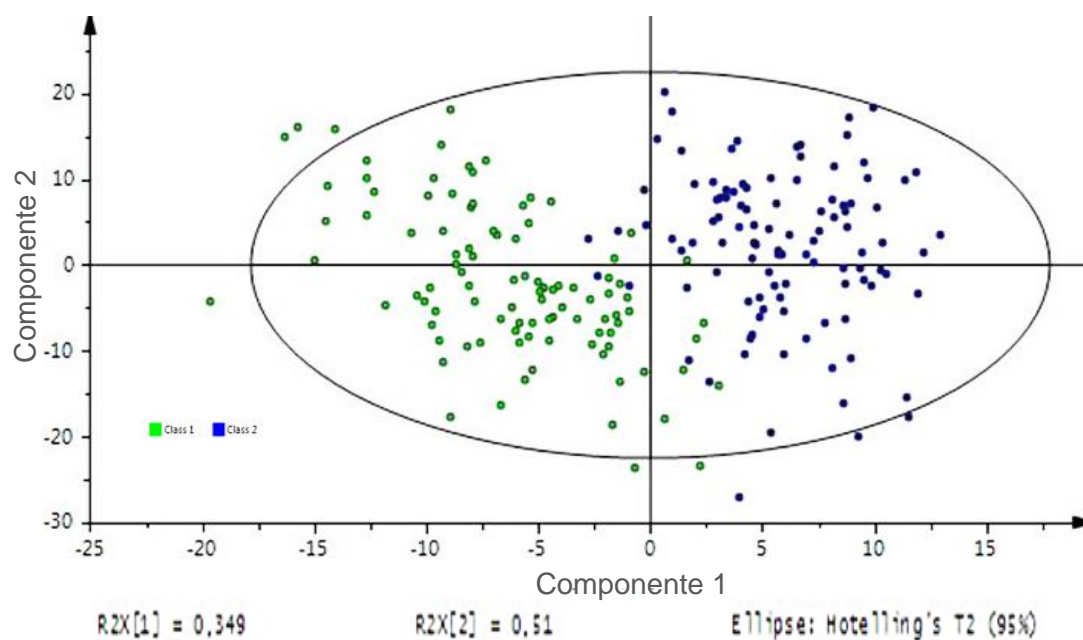


Figura 5-27. PLS-DA Score Plot, componente 1 frente a 2 para el Tratamiento B, cámara Xenics Colored according to clases.

Los valores VIP resumen la contribución total de cada longitud de onda al modelo PLS. Las variables con un mayor poder de discriminación para cada tratamiento

según el modelo elegido y su valor de importancia (VIP) se muestran en la Figura 5-28 para el tratamiento A y en la Figura 5-29 para el tratamiento B.

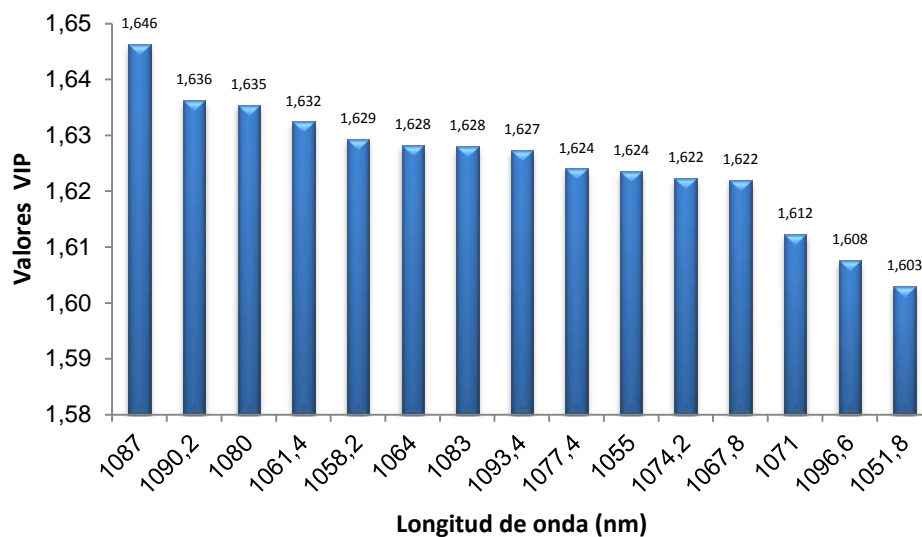


Figura 5-28 Importancia de la variable para la proyección (VIP) para las longitudes de onda con mayor poder de discriminación tratamientos A.

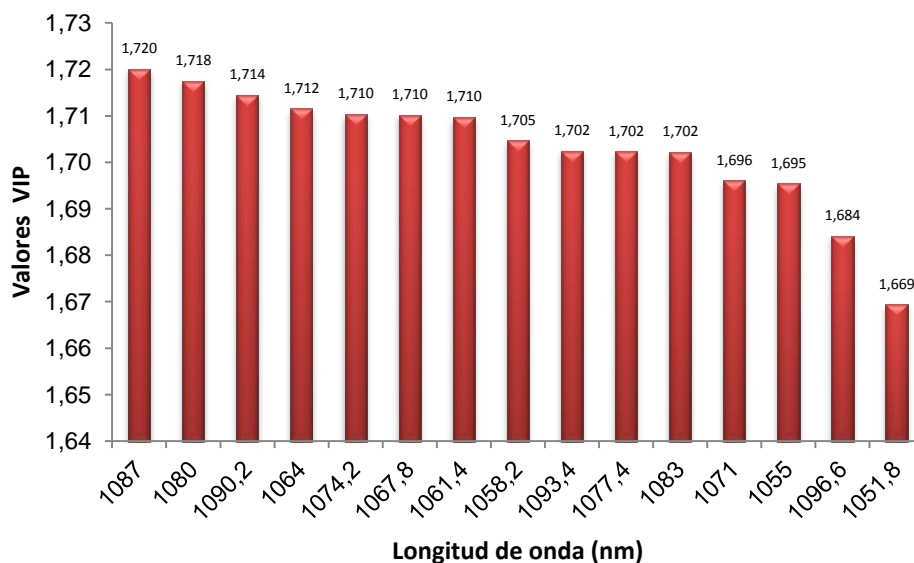


Figura 5-29 Importancia de la variable para la proyección (VIP) para las longitudes de onda con mayor poder de discriminación tratamientos B.

#### 5.4.3.4 Clasificación de los datos en grupos mutuamente excluyentes para los tratamientos A y B

Se observa que la evolución a lo largo del tiempo no es significativa por lo que se incluyen los datos correspondientes a todos los instantes de tiempo en el modelo obteniendo una muy buena clasificación. El modelo, finalmente, consigue un poder de acierto en la clasificación, incluyendo las observaciones previamente eliminadas a la hora de construirlo, del 98% para las sanas, y del 94% para las golpeadas.

Las Tablas 5-4 y 5-5 muestran la matriz de confusión obtenida para la clasificación de la fruta como sana o golpeada empleando PLS-DA para cada tratamiento.

Tabla 5-4 Matriz de confusión para el tratamiento A

<b><i>Predicho\Real</i></b>	<b>Sana</b>	<b>Golpeada</b>
<b>Sana</b>	98%	2%
<b>Golpeada</b>	6%	94%

Tabla 5-5 Matriz de confusión para el tratamiento B

<b><i>Predicho\Real</i></b>	<b>Sana</b>	<b>Golpeada</b>
<b>Sana</b>	100%	0%
<b>Golpeada</b>	7%	93%

El acierto en la clasificación de los píxeles de las manzanas sanas en el tratamiento A y en el tratamiento B, son prácticamente iguales 98% y 100%, con lo cual solo se tendrá un 2% de falsos positivos. En la clasificación de los píxeles de las manzanas golpeadas se alcanzó un acierto que oscila entre el 93% y 94% para los dos tratamientos, son prácticamente iguales por lo cual la clasificación tiene falsos positivos entre 6% y 7%.

Xing y De Baerdemaeker (2005) uso la una metodología de pre-procesado de los datos MSC y PLS, para detectar golpes en manzanas 'Jonagold', obteniendo una tasa de clasificación correcta de las zonas sanas de 84,6% y un 15,4 de falsos positivos. Para las zonas golpeadas obtuvo una tasa de acierto de 77,5% y un

22,5% de falsos positivos, adicionalmente clasifico la zona del pedúnculo teniendo una tasa de acierto del 98,3 y solo el 1,7% como desacierto, lo que indica que la elección de los algoritmos de clasificación propuestos para la manzana 'Fuji' (MSC y PLS-DA) es mejor ya que tiene mayor predicción que el propuesto en Xing y De Baerdemaeker (2005).

### 5.5 Relación de las imágenes Hiperespectrales con los parámetros fisiológicos poscosecha

Con los valores VIP de las longitudes de onda de los experimentos de seis horas y de los dos tratamientos, se establece un ranking de cinco longitudes de onda significativas para detectar las zonas golpeadas y sanas de las manzanas. Para esto se calcula el promedio del valor VIP para cada longitud de onda. Al reunir las 15 longitudes relevantes de los tres tratamientos (seis horas, tratamiento A y B), se obtienen distintos valores de VIP y se ilustran en la Figura 5-30. Se tomaron los cinco primeros valores de las longitudes de onda con un mayor poder de discriminación de las clases sana y golpeada para hacer el análisis de relación entre los parámetros fisiológicos poscosecha y las imágenes hiperespectrales.

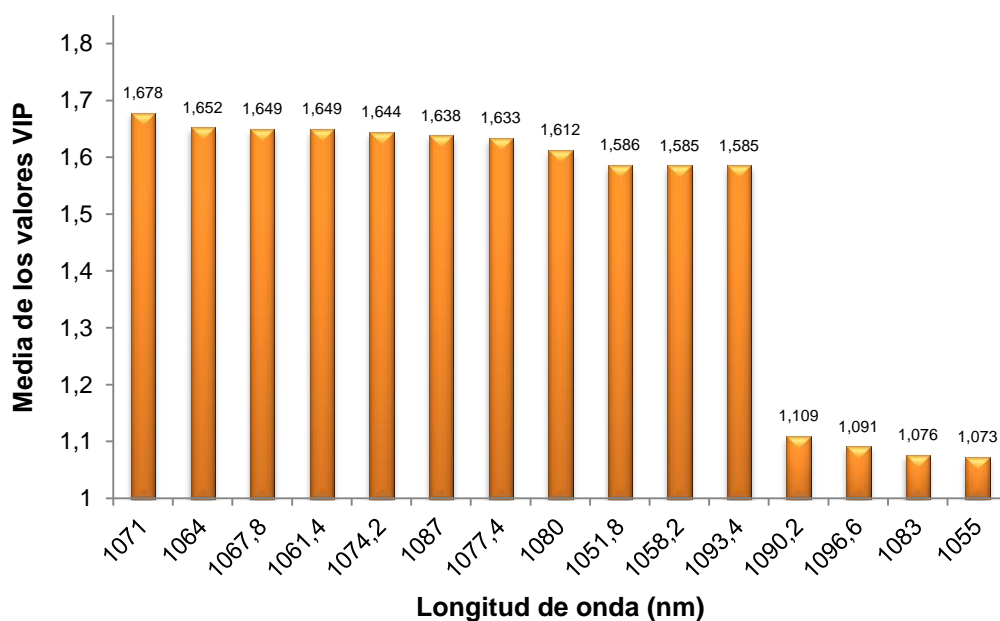


Figura 5-30 Longitudes de onda con mayor poder de discriminación

Con los valores VIP promedio se escogen las 5 primeras bandas con las longitudes de onda con un mayor poder de discriminación de las clases sana y golpeada, 1071, 1064, 1067.8, 1061.4 y 1074.2 nm con las cuales se puede identificar el golpe en la manzana 'Fuji', en la zona del espectro del rojo al infrarrojo cercano.

Xing et al (2007) encontró que en las bandas centradas en 558, 678, 728 y 892 nm, se detecta los golpes en manzanas 'Golden Delicious', hay que resaltar que los cultivares 'Golden' son de piel amarilla verdosa, con lo cual es posible que el efecto de la luz con su tono de piel haga posible detectar los daños en las longitudes del espectro del amarillo y verde.

ElMasry et al (2009) detecto los golpes en manzanas 'McIntosh' en tres longitudes de onda de la región del infrarrojo cercano 750, 820 y 960 nm. El cultivar 'McIntosh' tiene la piel roja algo parecida al cultivar 'Fuji' que tiene una tonalidad de piel de verde a roja, con lo cual sus golpes pueden ser identificados en la zona del espectro del rojo al infrarrojo cercano.

Por otra parte se resalta del trabajo de ElMasry et al (2008) que detecto los daños después de una hora de haber ocurrido, lo que corrobora que los factores tiempo y clase (Golpe o Sano) no es significativo en la clasificación de la fruta ( $p < 0,05$ ) en la clasificación obtenida para las manzanas 'Fuji'.

Xing y De Baerdemaeker (2007) detectaron los golpes antes de 45 minutos después de ocasionados los golpes en cultivares 'Golden Delicious', 'Jonagold' y 'Braeburn'. Igualmente en el trabajo de Baranowski et al (2012) detecto los golpes antes de una hora de ocurrido el impacto, los cultivares estudiados fueron 'Idared', 'Golden Delicious', 'Gloster', 'Champion' y 'Topaz'. Todas variedades de piel roja excepto el cultivar 'Golden Delicious', llegando a pensar que las variedades con tonalidades rojas pueden detectarse sus golpes en la zona del espectro del rojo al infrarrojo cercano en tiempos inferiores a una hora y antes de que sean visibles por el ojo humano.

En el trabajo de Baranowski et al (2013) siguió la evolución del golpe durante dos semanas, en cultivares 'Champion', 'Gloster', 'Golden Delicious', 'Idared' y 'Topaz' en la región espectral de 750 a 850 nm y de 900 a 1900 nm. Con el objeto de identificar el golpe con la mayor precisión posible, concluyendo que la reflectancia de las regiones afectadas cambian significativamente con el tiempo, las longitudes de onda más significativas para identificar el golpe son 970, 1200, 1470 y 1900 nm.

El trabajo de Baranowski et al (2013) es algo parecido a lo que se realizó en el presente estudio, seguir la evolución del golpe e identificar las longitudes de onda con las que se puede identificar claramente el golpe, pero es evidente que a través del tiempo la mancha que se produce se vuelve cada vez más visible y por ende la clasificación por medio de tecnología espectral podría remplazarse por análisis de imagen RGB donde se identifique los pixeles del golpeados, y no realizar análisis espectrales que son más costosos a nivel de tiempo y nivel de programación de los algoritmos de análisis.

En Liu y Ying (2005), establece un modelo de estimación de SST, acidez titulable y pH para manzanas 'Fuji', usando los logaritmos de la reflectancia en un rango de 812 a 2357 nm, obteniendo unos coeficientes de correlación de 0.968 para SST, 0.728 para acidez titulable y 0.831 para el pH. El rango espectral de este estudio es muy amplio y no establece las bandas en las que puede extraer la información del comportamiento de estos parámetros.

Por otro lado, Xiaobo et al (2005) encontró las longitudes de onda en las cuales puede realizar una estimación de SST en manzanas 'Fuji' usando el modelo estadístico PLS, con el cual obtuvo las longitudes de onda de 799 a 870 nm como las representativas para predecir los SST con un coeficiente de correlación de 0,948. Las longitudes de onda identificadas en el presente estudio están desfasadas de las encontradas por Xiaobo et al (2005).



Una de las posibles razones del desfase de las longitudes de onda, es la forma de medición de la reflectancia, en el presente estudio se realizó en dos zonas (sana y golpeada) mientras que en el trabajo de Xiaobo et al (2005) solo uso pixeles de la zona sana.

Luo et al (2012) encontró que en la región del espectro entre 740 a 830 nm es posible detectar daños por golpe en manzana usando como clasificador la curva Roc. Estableció cuatro pares de longitudes de onda dependiendo del cultivar para 'Fuji' 808 - 760 nm, 'Jonagold' 832 - 772 nm, 'Orin' 834 - 762 nm 'Sinano Gold' 788 - 742 nm, igualmente otros investigadores, Geoola et al (1994) y Upchurch et al (1994) encontraron que de 740 a 840 nm se detectan golpes claramente en distintos cultivares.

Al coincidir estos autores en las regiones del espectro, es posible que el rango espectral usado no alcance a cubrir las zonas en las que encontramos que se puede realizar una correcta clasificación (1061.4 - 1074.2 nm), por ejemplo Luo et al (2012) trabajo en la región de 380 a 1000 nm y Geoola et al (1994) trabajo en la región de 400 a 840 nm.

Al no tener una comparación directa con algún investigador que emplee la misma región del espectro (400 a 1700 nm) y el mismo cultivar ('Fuji') se establece que para este estudio, la región del espectro encontrada (1061.4 a 1074.2 nm) clasifica los pixeles de sanos y golpeados a dos temperaturas de almacenamiento diferentes (4 °C y 20 °C) de manera acertada usando un PLS-DA.

En las figuras 5-31 y 5-32 se observa la evolución de reflectancia de las zonas con golpe y sanas del tratamiento A y B respectivamente en manzanas 'Fuji', correspondiente a las longitudes de onda del ranking. También se ve que el cambio entre longitudes de onda es mínimo con lo cual se podría promediar para tratarlo como una sola longitud de onda. (Figuras 5-33 y 5-34)

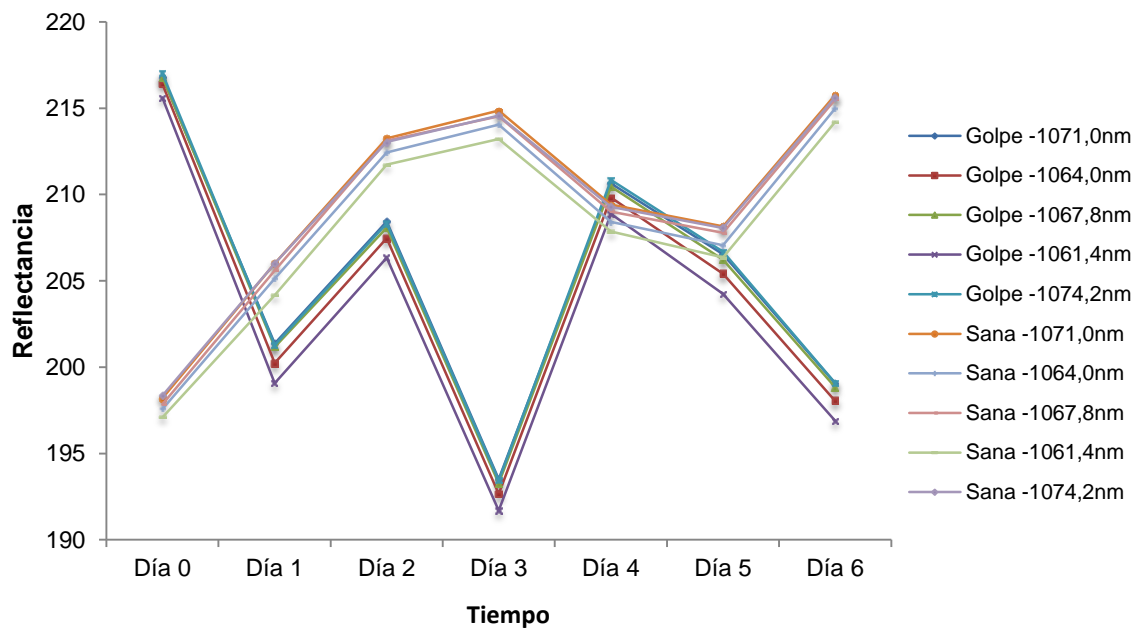


Figura 5-31 Evolución de las zonas sanas y con golpe del tratamiento A de las bandas del ranking.

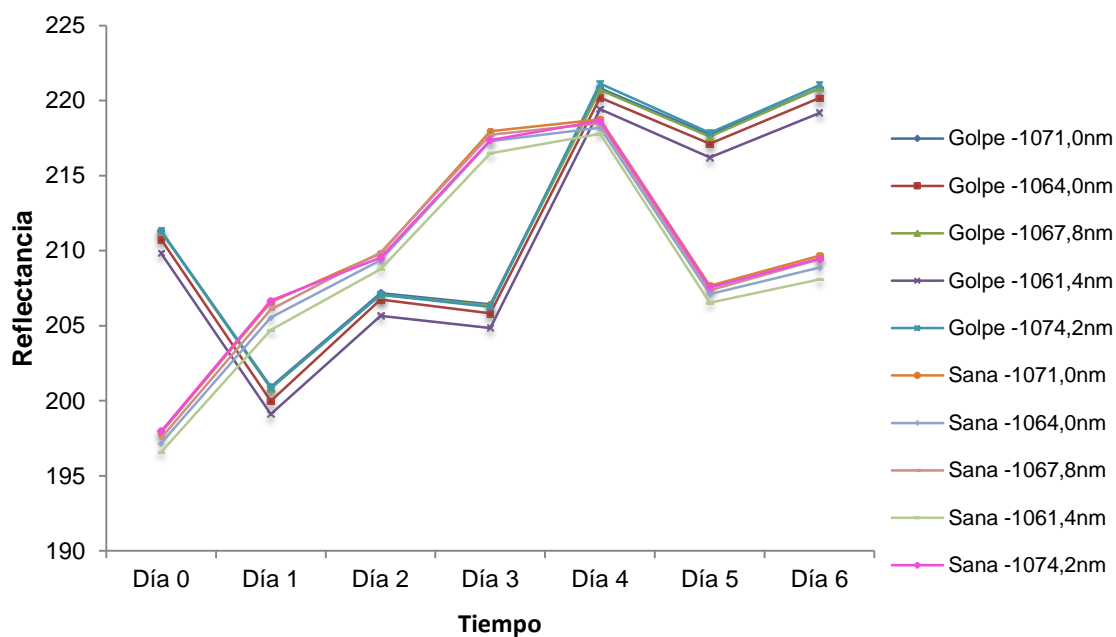


Figura 5-32 Evolución de las zonas sanas y con golpe del tratamiento B de las bandas del ranking.

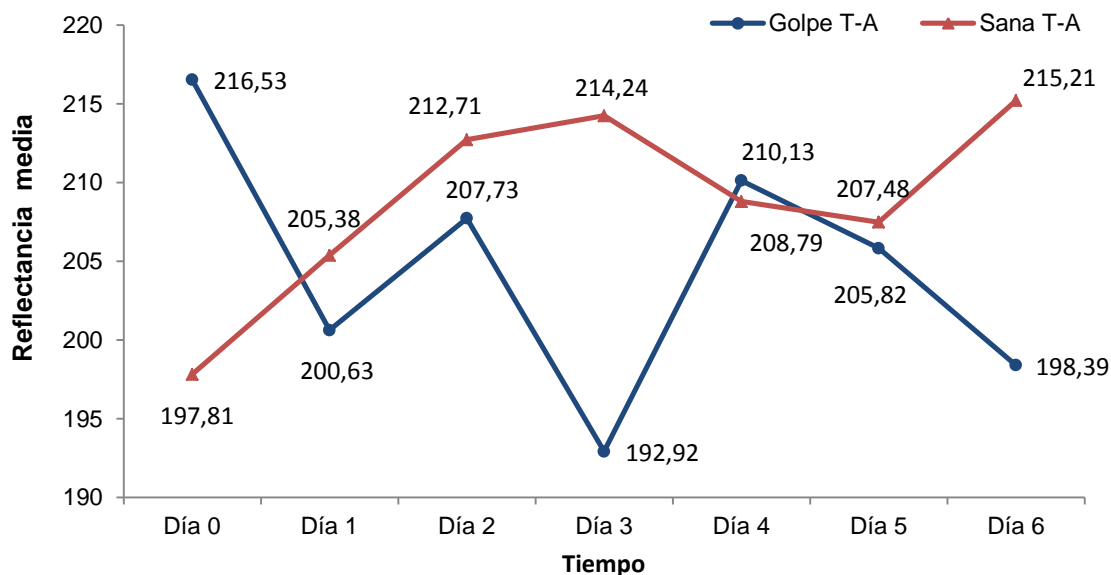


Figura 5-33 Evolución de la longitud de onda media de las zonas sanas y con golpe del tratamiento A.

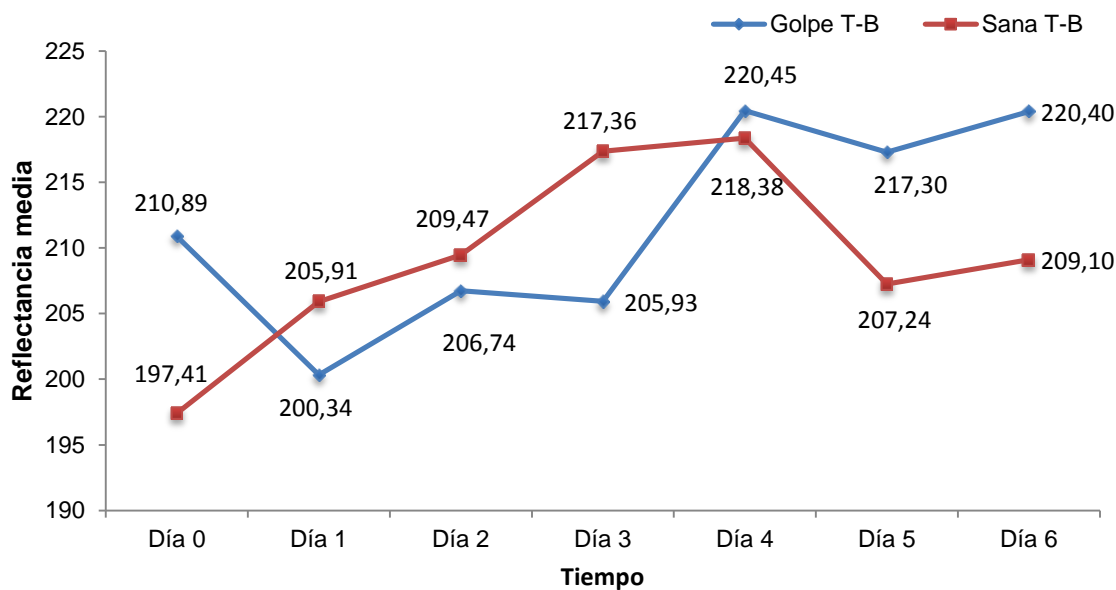


Figura 5-34 Evolución de la longitud de onda media de las zonas sanas y con golpe del tratamiento B.

Con los resultados de las pruebas fisiológicas se identificaron los máximos y mínimos valores de los puntos de las curvas y se comparan con los máximos y

mínimos valores de los espectros de la longitud de onda promedio de las zonas sanas y con golpe para los dos tratamientos.

En la Tabla 5-6 se muestra las medias de los días para todos los ensayos de la respuesta fisiológica al daño mecánico por golpe del tratamiento A, en azul se representan los valores más bajos y en amarillo los valores altos. Los máximos valores de SST (15,27 °Brix), acidez (0,26% ácido málico) y firmeza (0,88 N), se presentaron en el día 0, igual al mayor valor en el espectro (216,52) lo que ilustra que existe una relación de las variables fisiológicas y el valor de la reflectancia para ese día.

Los SST y la acidez tiene el valor máximo en el día 0 ya que en el momento del golpe no se desplaza el agua de las células, con lo cual, la medida tomada es la casi igual que la medida de control, igualmente la firmeza tiene el máximo valor en el mismo día, es normal que la firmeza sea mayor en el primer momento ya que a partir que se empiece los procesos metabólicos acelerados por efecto de la contusión se pierda la firmeza en el tiempo. La media de la reflectancia en el día 0, que es máxima registrada, coincide con los parámetros de SST, acidez y firmeza, por lo que se establece una relación directa, que podría modelarse a través de mayor experimentación tanto de los parámetros fisiológicos como de imágenes espectrales.

El valor mínimo de reflectancia (192,92) registrado en el día 3, coincide con el valor mínimo de los SST (13,57 °Brix) (en azul Tabla 5-6), este valor se presenta ya que a partir del día 2 se empieza a formar una zona corchosa con poca presencia de agua, y se registra a través de la reflectancia ya que las longitudes de onda encontradas concuerda con las longitudes de absorción de agua encontradas en Piotr et al (2013) para manzanas.

Los demás valores picos de las variables fisiológicas que no coincidieron con los de la reflectancia, posiblemente no tengan ninguna relación con las longitudes de

onda del ranking por lo tanto sería necesario ampliar la cantidad de datos de las variables fisiológica y emplear otro tipo de análisis estadísticos sobre las imágenes, donde se busque una respuesta espectral al cambio fisicoquímico de la fruta, ya que el PLS-DA solo clasifica en diferentes clases y su finalidad es distinguir entre las zonas sanas y con golpe, con lo cual no se puede establecer una correlación directa entre estas dos medidas.

Tabla 5-6 Medias de cada día para los diferentes ensayos de respuesta al golpe del tratamiento A.

Día / Prueba	Día 0		Día 1		Día 2		Día 3		Día 4		Día 5		Día 6	
	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana
SST (°Brix)	15,27	14,00	13,60	13,48	14,35	14,17	13,57	13,27	13,77	12,80	14,30	13,95	13,83	14,13
Acidez % (Málico)	0,26	0,25	0,23	0,21	0,19	0,18	0,20	0,24	0,18	0,20	0,21	0,28	0,19	0,25
Firmeza (N) Instrom	0,88	1,47	0,86	1,46	0,85	1,11	0,81	1,23	0,87	1,50	0,76	1,50	0,69	1,41
CO <sub>2</sub> (%)	0,17	0,16	0,31	-	-	-	-	-	0,13	-	-	-	0,12	-
Etileno (µL/kg.h)	30,67	67,67	59,36	-	-	-	-	-	20,18	-	-	-	26,09	-
Reflectancia promedio	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana
	216,52	197,81	200,62	205,38	207,73	212,71	192,92	214,24	210,13	208,79	205,82	207,48	198,39	215,21

La Tabla 5-7 muestra las medias para el tratamiento B, en amarillo se representa los valores máximos altos y en azul los mínimos. La acidez (0,28% ácido málico), firmeza (0,96 N) y CO<sub>2</sub> (0.49%) presentaron valores máximos en el día 1, igual que el menor valor de la reflectancia (200,34), al contrario del anterior tratamiento se presenta una relación inversa.

Tabla 5-7 Medias de cada día para los diferentes ensayos de respuesta al golpe del tratamiento B.

Día / Prueba	Día 0		Día 1		Día 2		Día 3		Día 4		Día 5		Día 6	
	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana
SST (°Brix)	14,92	13,53	14,67	14,92	13,83	14,30	13,43	13,90	13,57	13,87	14,63	15,17	14,42	14,07
Acidez % (Málico)	0,25	0,22	0,28	0,18	0,17	0,19	0,16	0,22	0,21	0,22	0,24	0,29	0,24	0,27
Firmeza (N) Instrom	0,79	1,31	0,96	1,50	0,71	1,00	0,62	1,13	0,84	1,46	0,88	1,45	0,66	1,35
CO <sub>2</sub> (%)	0,32	0,36	0,49	-	-	-	-	-	0,28	-	-	-	0,36	-
Etileno (µL/kg.h)	183,5	162,64	88,67	-	-	-	-	-	22,89	-	-	-	46,67	-
Reflectancia promedio	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana	Golpe	Sana
	210,89	197,41	200,34	205,91	206,74	209,47	205,93	217,36	220,45	218,38	217,30	207,24	220,40	209,10

El mismo comportamiento de relación inversa se obtuvo para la reflectancia máxima (220,45) en el día 4 y los valores mínimos de CO<sub>2</sub> (0.49%) y etileno ( $\mu\text{L kg}^{-1}\text{h}^{-1}$ ), suponemos que el efecto de la temperatura puede afectar esta relación, siendo que el tratamiento B se mantuvo constante a una temperatura 20°C influyendo sobre una más rápida evolución de la mancha ocasionada sobre el color de la piel de la manzana; con lo cual tenemos este cambio de relación, el cual queda registrado con el mínimo de reflectancia, lo cual concuerda con la teoría, que un valor de reflectancia cercano a cero es ausencia de luz o color negro absoluto y color blanco es cercano a 255 si se maneja en un sistema de 8 bits.

## 6. CONCLUSIONES

Se analizó los momentos donde ocurre el daño mecánico en las manzanas durante el proceso de recolección y transporte, desde el cultivo hasta la salida del producto en la central de acopio, concluyendo que se pueden presentar golpes, rozaduras, vibraciones y aplastamiento, principalmente durante el proceso de volcado de las frutas a las tolvas de recepción.

Se siguió el comportamiento fisiológico poscosecha de las manzanas estresadas por daño mecánico a dos temperaturas de almacenamiento; 4 °C (tratamiento A) y 20 °C (tratamiento B), y se identificaron los valores máximos y mínimos de las curvas de los ensayos de firmeza, acidez, sólidos solubles totales (SST), CO<sub>2</sub>, y etileno.

Para todos los ensayos del comportamiento fisiológico se buscó los valores máximos y mínimos que se usaron en la relación con los valores máximos y mínimos de reflectancia de las longitudes de onda seleccionadas. Para el tratamiento A la firmeza máxima se presentó en el día cero (0,88 N), y la mínima en el día seis (0,69 N). En el tratamiento B el máximo (0,96 N) fue en el día uno y el mínimo (0,62 N) en el día tres. La acidez para el tratamiento A, el valor máximo (0,26% ácido málico) y mínimo (0,18%) se presentaron en el día cero y cuatro respectivamente, mientras que para el tratamiento B se presentaron en el día uno (0,28%) y día tres (0,16%).

En los SST los valores máximos y mínimos de los tratamientos A y B se presentaron en los días cero y tres respectivamente, en el tratamiento A 15,27 y

13,57 °Brix en el tratamiento B 14,92 y 13,43 °Brix. El CO<sub>2</sub> presentó en el tratamiento A y B el máximo valor en el día uno (0,31% y 0,49%), el mínimo para el tratamiento A fue en el día seis (0,12%) y para el tratamiento B (0,28%) en el día cuatro.

El etileno presentó los valores máximos en los tratamientos A y B en los días uno (59,36 µL/kg.h) y cero (183,5 µL/kg.h) respectivamente, mientras que los valores mínimos se presentaron en el día cuatro, para el tratamiento A (20,18 µL/kg.h) y para el tratamiento B (22,89 µL/kg.h).

Se sentaron las bases de un sistema basado en imagen espectral infrarroja, potencialmente capaz de detectar los golpes en manzanas antes de que sean claramente visibles, lo que puede ayudar a mejorar la selección de la calidad de las manzanas en poscosecha.

Se creó un software para la adquisición de las imágenes hiperespectrales que permite controlar la calibración, sincronización y adquisición de las imágenes con el sistema basado en LCTF, así como controlar las condiciones del experimento, este software se denominó Fruitspectro.

Se desarrollaron dos aplicaciones en MatLab para el tratamiento de los datos de las imágenes espectrales. Estas aplicaciones se han empleado para la corrección espacial y espectral de las imágenes usando un blanco de referencia (BWcorrection) y para la obtención el conjunto etiquetado de datos (Etiquetador Espectral) mediante la extracción de información de las regiones de interés (zonas golpeadas y sanas) de las manzanas.

Se encontró que para la evolución del daño en los días posteriores al golpe, el espectrómetro de imagen (cámara Xenics) ofreció un intervalo de confianza (95%) con un poder predictivo muy superior al sistema basado en LCTF, por lo que se



deduce que el daño se puede detectar más fácilmente en las longitudes de onda obtenidas por este equipo.

Se encontraron las longitudes de onda más significativas (1071, 1064, 1067.8, 1061.4 y 1074.2 nm) a través de un análisis discriminante por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA), obteniendo que la zona del infrarrojo cercano (NIR) entre 1050 y 1100 nm es que la tiene un mayor poder de clasificación entre las dos clases estudiadas (sana y golpeada),

Se estudió la evolución temporal del daño con el objetivo de determinar el momento a partir del cual la detección es posible. Por lo tanto, el efecto del tiempo (evolución del golpe) no es significativo en la clasificación de los píxeles de la fruta, lo que quiere decir que desde el primer momento del golpe este sistema es capaz de determinar la existencia de un daño, lo que permite su aplicación práctica en la industria, si bien sería necesario reducir todavía más el número de bandas seleccionadas y construir un sistema capaz de inspeccionar las manzanas en una línea de clasificación.

Se estableció la relación entre los datos obtenidos con la técnica de análisis espectral (PLS-DA) y los resultados de la evolución del comportamiento fisiológico en almacenamiento de la manzana 'Fuji', con lo que posiblemente haya una relación directa en el tratamiento A y una relación inversa en el tratamiento B.

Se comprobó que es posible detectar el daño por golpe en la zona del infrarrojo cercano (NIR) entre 1050 y 1100 nm, desde el momento que ocurre, lo que permite su aplicación práctica en la industria agroalimentaria.

## **Recomendaciones**

Es necesario ampliar la información de los datos de los ensayos de los parámetros fisiológicos, para obtener relaciones más altas entre los datos espectrales.

El método estadístico de análisis de imágenes espectrales empleado PLS-DA, busca maximizar la separación de los valores en diferentes clases y por ello no se ha podido establecer una alta correlación de las imágenes y la evolución fisiológica del daño. Se debe aplicar otro tipo de métodos, como por ejemplo el MCR (Multivariate Curve Resolution), que se emplea para resolver mezclas mediante la determinación de los perfiles de respuesta (espectros, perfiles de pH, a perfiles de tiempo, perfiles de elución) y sus concentraciones estimadas cuando no hay información previa sobre la naturaleza y la composición de los compuestos.

Es necesario profundizar en el estudio de la respuesta espectral a un cambio fisicoquímico complejo como es la evolución de los parámetros fisiológicos poscosecha de frutas y hortalizas, para obtener resultados veraces y que ayuden a identificar la calidad del producto agrícola sin necesidad de las pruebas destructivas.

Para llegar a un desarrollo transferible a la industria, hay que ahondar en la selección de bandas de forma que se puedan llegar a tener resultados aceptables empleando un máximo de cinco longitudes de onda, ya que este es el número máximo de bandas que actualmente pueden capturar las cámaras multiespectrales comerciales, lo que facilitaría su incorporación a la industria al estar la tecnología de adquisición ya preparada para ello.

## BIBLIOGRAFÍA

- Altisent R.R. (2010). Regeneración aromática y calidad en manzanas (*Malus domestica* Borkh.) almacenadas en atmósfera controlada con muy bajo nivel de oxígeno. Tesis doctoral. Universitat de Lleida. España. 330 p
- Ariana D, Lu R, and Guyer D. (2006). Near-infrared hyperspectral reflectance imaging for detection of bruises on pickling cucumbers. *Computer and Electronics in Agriculture*, 53(1):60– 70.
- Ascaso A, y Liso M. (1970). Introducción al estudio de la evapotranspiración y clasificación climática de la Cuenca del Ebro, *Anales de Aula Dei*, Zaragoza. Cap. 10 págs. 1-2.
- Asrey R, Patel V.B., Singh S.K., and Sagar V.R. (2008). Factors affecting fruit maturity and maturity standards - A review. *J. Food Sci. Tech.* 45, 381-390.
- Aunión F. (2002). Influencia de los Impactos Mecánicos en Manzanas (Granny Smith) sobre la Respiración y Otras Propiedades Físicas. Trabajo Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Valencia. 237 p
- Bajema R, Baritelle A, Hyde G, and Pitts M. (2000). Factors influencing dynamic mechanical properties of Red Delicious apple tissue. *Am. Soc. Agric. Eng*, 43 (6): 1725-1731
- Bajema R, and Hyde G. (1998). Instrumented pendulum for impact characterization of whole fruit and vegetable specimens. *Am. Soc. Agric. Eng*, 41(5): 1399-1405
- Baranowski P, Mazurek W, Wozniak J. (2013). Supervised classification of bruised apples with respect to the time after bruising on the basis of hyperspectral imaging data. *Postharvest Biology and Technology*. 86: 249–258
- Baranowski P, Mazurek W, Wozniak J, Majewska U. (2012). Detection of early bruises in apples using hyperspectral data and thermal imaging. *Journal of Food Engineering* 110(3): 345–355

- Barceló J, Nicolás G, Sabater B, y Sánchez, R. (2001). Fisiología Vegetal. Ed. Pirámide. Capítulo 20, pág. 275-292.
- Blahovec J. (2006). Shape of bruise spots in impacted potatoes. *Postharvest Biology and Technology* 39(3), 278-284.
- Blasco J. (2001). Concepción de un sistema de visión artificial multispectral para la detección e identificación de daños en cítricos. Tesis de Doctorado Universidad Politècnica de Valencia, 211 p
- Bollen A, Cox N, Dela Rue B, and Painter, D. (2001). A descriptor for damage susceptibility of a population of produce. *J. Agric. Engineering Res*, 78 (4): 391 – 395
- Botero H.J. (2009). Determinación del nivel foliar de nutrientes mediante espectroscopia de reflectancia. Tesis de Magister. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 115 p
- Casaca A.D. (2005). El cultivo de la Manzana (*Pyrus malus*) 9. Guías tecnológicas de frutas y hortalizas. Proyecto de modernización de los servicios de tecnología agrícola, Costa Rica. Disponible en internet en: <http://www.dicta.hn/files/Manzana,-2005.pdf> [Consulta: 13 de noviembre de 2012].
- Castelló G.M. (2007). Efecto de las condiciones de operación en los cambios fisicoquímicos y fisiológicos de frutas mínimamente procesadas por deshidratación osmótica. Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Valencia. España, 237 p
- Contreras O.A. (2010). Efecto de tratamientos poscosecha novedosos en la calidad fisicoquímica, sensorial y nutricional de cítricos. Tesis Doctoral, Universidad Politècnica de Valencia. España. 227 p
- Cripps, J.E, Richards, L.A. and A. M. Mairata. (1993). 'Pink Lady' apple. *HortScience* Numero 28: pág. 10-57.
- Cubero S, Aleixos N, Albert A, Torregrosa A, Ortiz C, García-Navarrete O, and Blasco J. (2013). Optimised computer vision system for automatic pre-grading of citrus fruit in the field using a mobile platform. *Precision Agriculture*, 6: 1-15.
- Cubero S, Aleixos N, Moltó E, Gómez-Sanchis J, and Blasco J. (2011). Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables. *Food and Bioprocess Technology* 4(4): 487-504.

- Cubero S, Moltó E, Gutiérrez A, Aleixos N, García-Navarrete O.L, Juste F, and Blasco J. (2010). Real-time Inspection of Fruit by Computer Vision on a Mobile Harvesting Platform under Field Conditions. *Progress in Agricultural Engineering Sciences* 6 (2010), 1–16.
- Cuquerella, J. (1990). Efectos de distintos recubrimientos céreos y plásticos en la fisiología post-recolección y en la calidad de frutos cítricos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España, 204 p
- Chen P, and Ruiz-Altisent M. (1993). Effect of impact mass on firmness sensing of fruits. ASAE meeting presentation. The American Society of Agricultural Engineers. Disponible en internet en: [http://oa.upm.es/6158/1/Barreiro\\_67.pdf](http://oa.upm.es/6158/1/Barreiro_67.pdf) [Consulta: 13 de noviembre de 2012].
- Chen Y, Chao K, and Kim M. (2002). Machine vision technology for agricultural applications. *Computers and electronics in agriculture*, 36:173–191.
- Del Río, M, Mazzuz, C, Gómez De Barreda L, y Sendra G. (2000). Evaluación de los impactos y la influencia de la línea de confección sobre la calidad de frutos de naranja Lanelate. *Todo CITRUS*, 11: 5 – 16
- Delaporte N. (1971). Effect of oxygen content of atmosphere on ascorbic acid content of apple during controlled atmosphere storage. *Lebens Wiss Technol.* 4: 106-12.
- Delhom M.J. (1987). Conservación frigorífica de las manzanas. Hojas divulgativas Número 16/87 HD. Ministerio de agricultura pesca y alimentación. España, 32 p
- Du C.J, and Sun. D.W. (2006). Learning techniques used in computer vision for food quality evaluation: a review. *Journal of Food Engineering.* 72: 39–55.
- El-Kazzaz M, Sommer N, and Fortlage R. (1983). Effect of Controlled Atmospheres on Postharvest decay and quality of fresh strawberries. *Phytopathology* 73: 282 – 285
- ElMasry G, Wang N, Clement Vigneault C. (2009). Detecting chilling injury in Red Delicious apple using hyperspectral imaging and neural networks. *Postharvest Biology and Technology.* 52: 1–8
- ElMasry G, Wang N, Clement Vigneault C, Qiao J, ElSayed A. (2008). Early detection of apple bruises on different background colors using hyperspectral imaging. *LWT* 41: 337–345

- Eriksson L, Johansson E, Kettaneh-Wold N, and Wold S. (2001). Multi- and Megavariate Data Analysis. Principles and Applications. Umetrics: Umea. 426 p
- FAO. (2010). Base de datos estadísticos integrada on-line FAOSTAT. En línea en <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> (4-2012)\ [Consulta: 1 de noviembre de 2012].
- FAO. (1993). Prevención de pérdidas de alimentos poscosecha: frutas, hortalizas, raíces y tubérculos. En línea en <http://www.fao.org/docrep/T0073S/T0073S00.htm> [Consulta: 21 de septiembre de 2012].
- Flores R.K. (2009). Determinación no destructiva de parámetros de calidad de frutas y hortalizas mediante espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba. España, 182 p
- Freifeld D. (2005). Desarrollo de métodos analíticos para la detección de cambios metabólicos frente a situaciones de estrés en fruta fresca. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. España, 252 p
- Frutos, L. M. (1987). Enciclopedia temática de Aragón: Geografía, vol. 5, ed. Moncayo, Zaragoza, 301 p
- Gaffney J. (1973). Reflectance properties of citrus fruit. Transactions of the ASAE, 16(1):310–314.
- García-Navarrete O.L. (2011). Estudio de costes de la recolección de naranjas por vibrador de troncos mediante análisis de sensibilidad. Tesis de Máster Universidad Politécnica de Valencia. España. 86 p
- Geola F, Geola F, Peiper U.M. (1994). A spectrophotometric method for detecting surface bruises on 'Golden Delicious' apples. Journal of Agricultural Engineering Research 58 (1): 47-51
- Gómez-Sanchis J. (2009). Detección automática de podredumbres en cítricos mediante procesamiento avanzado de imágenes hiperespectrales. Tesis Doctoral, Universidad de Valencia. España. 180 p
- Hasegawa Y, Yano M, Iba Y, Makita Y, and Konakahara M. (1989). Factors deteriorating the quality of Satsuma mandarin fruit on the packing house line and their improvement. Bulletin of the fruit tree Research Station, B Okitsu, Japón, 16: 29 – 40

- Hernández O. (2011). Índices de madurez relacionados con la calidad de la fruta. Material del curso taller. Análisis de puntos críticos en postcosecha, control de calidad en Packing y en líneas de embalaje, con énfasis en daño por impacto”Universidad de Talca. Chile. Disponible en Internet: [http://pomaceas.otalca.cl/html/araucania/Docs/pdf/\(5\)Actividad%20Frusan%20%2014-07-2011-/Omar%20Hernandez.pdf](http://pomaceas.otalca.cl/html/araucania/Docs/pdf/(5)Actividad%20Frusan%20%2014-07-2011-/Omar%20Hernandez.pdf) [Consulta: 12 de septiembre de 2012]
- Hyde G.M. (1997). Bruising-Impacts, Why Apples Bruise, and What You can do to Minimize Bruising. Washington State University - Tree Fruit Postharvest Journal, 8 (4): 9 – 12
- Izquierdo G.J. (2011). Análisis metabonómico para la identificación de biomarcadores en enfermedades respiratorias. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid. España. 151 p
- Kader A. (2007). Biología y tecnología poscosecha: Un panorama. In Tecnología Poscosecha de Productos Hortofrutícolas. 3ª edición. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, Oakland, California, USA. pp. 43-54.
- Kader A.A. (2008). Flavor quality of fruits and vegetables. J .Sci. Food Agric. 88: 1863-8
- Kays S. (1991). Postharvest Physiology of Perishable Plant Products. An a VI book. Van Nostrand Reinhold. 532 p
- Kim, M, Chen, Y, and Mhel, P. (2001). Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety. Transactions of the ASAE, 44(3):721-729.
- Kim M, Leftcourt A, Chen Y, and Tao Y. (2005). Automated detection of fecal contamination of apples based on multispectral fluorescence image fusion. Journal of food engineering, 71:85-91.
- Kooistra L, Wehrens R, Leuven R.S, and Buydens, L.M. (2001). Possibilities of visible near-infrared spectroscopy for the assessment of soil contamination in river floodplains. Analytica Chimica Acta. 446: 97-105.
- Laurila E, Kervinen R, Ahvenainen R. (1998). The inhibition of enzymatic browning in minimally processed vegetables and fruits. Postharvest news and information, 9 (4): 53 -66
- Liu Y, Ying Y. (2005). Use of FT-NIR spectrometry in non-invasive measurements of internal quality of ‘Fuji’ apples. Postharvest Biology and Technology 37: 65–71

- Longoria G.A. (2006). Material del curso de fisiología vegetal Respiración y fororespiración. Instituto tecnológico Altamira. México. Disponible en internet en: <http://arnolongo.wikispaces.com/file/view/RESPIRACION%20Y%20FOTORRESPIRACION%20C3%93N.pdf/215989534/RESPIRACION%20Y%20FOTORRESPIRACION%20C3%93N.pdf> [Consulta: 1 de noviembre de 2012].
- Lorente D, Aleixos N, Gómez-Sanchis J, Cubero S, García-Navarrete O.L. and Blasco J. (2012). Recent Advances and Applications of Hyperspectral Imaging for Fruit and Vegetable Quality Assessment. Food and Bioprocess Technology. 5 (4): 1121-1142.
- Luo X, Takahashi T, Kyob K, Zhang S. (2012). Wavelength selection in vis/NIR spectra for detection of bruises on apples by ROC analysis. Journal of Food Engineering. 109(3): 457-466
- Mayer A. (1987). Polyphenol oxidases in plants: recent progress. Phytochemistry, 26 (1): 11 - 20
- Menesatti P, Zanella A, D'Andrea S, Costa C, Paglia G, and Pallottino F. (2009). Supervised multivariate analysis of hyper-spectral NIR images to evaluate the starch index of apples. Food and Bioprocess Technology, 2, 308-314.
- Mehl P, Chen Y, Kim M, Chan D. (2004). Development of hyperspectral imaging technique for the detection of apple surface defects and contaminations. Journal of food engineering, 61:67–81.
- Mitcham E.J, Crisosto C.H, y Kader A.A. (1996). Manzana Fuji: Recomendaciones para Mantener la Calidad Postcosecha. Department of Plant Sciences, University of California, Davis, CA 95616. Disponible en internet en: [http://postharvest.ucdavis.edu/frutasymelones/Manzana\\_Fuji/](http://postharvest.ucdavis.edu/frutasymelones/Manzana_Fuji/) [Consulta: 11 de noviembre de 2012].
- Moggia C, y Pereira M. (2006). Almidón y maduración en manzanas. Revista Pomaceas. Universidad de Talca, 6(3): 4 p
- Muhammed H. (2005). Hyperspectral crop reflectance data for characterising and estimating fungal disease severity in wheat. BiosystemEngineering, 91(1):9–20.
- Nicolai BM, Lötze E, Peirs A, Scheerlinck N, and Theron KI. (2006). Non-destructive measurement of bitter pit in apple fruit using NIR hyperspectral imaging. Postharvest Biology and Technology, 40: 1-6.



- Nuñez O, Porro D, Talavera I, Bustio L, Hernández N, and Larín R. (2009). New Automatized System for the Chemical and Biochemical Data Analysis. Memorias de la convención de salud e informática 2009. Ciudad de la Habana, Cuba. Pág. 9-13
- Pantastico E.B. (1979). Fisiología de la postrecolección, manejo y utilización en vegetales tropicales y subtropicales. Ed. Continental. México. 663 p
- Parker M, Wardoswki W, and Dewey, D. (1984). A damage test for oranges in a commercial packing house line. Proceedings of the Florida State Horticultural Society, 94:136-137
- Parra A, y Hernández J. (2005). Fisiología de poscosecha de frutas. Unidad de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia. 67 p
- Prats-Montalbán J.M, De Juan A, and Ferrer A. (2011). Multivariate image analysis: A review whit applications. Chermometrics and Intelligent Laboratory Systems, 107: 1-23.
- Prusia S.E. (1985). Ergonomics of manual harvesting. Applied Ergon. 16, 209-215.
- Romojaro F, Martínez-Madrid M.C, y Pretel M.T. (2006). Factores precosecha determinantes de la calidad y conservación en poscosecha de productos agrarios. V Simposio Ibérico VIII Nacional de Maduración y Post-Recolección, Orihuela Alicante. pp. 91-96.
- Ruiz-Altisent M. (2000). Reducción de daños mecánicos en la manipulación de frutas. Vida Rural, 113:68-70
- Salisbury F.B. y Ross C. (1994). Fisiología Vegetal. Grupo Editorial Iberiamericano. México. 759 p
- Saltveit M.E. (2004). Respiratory Metabolism. Mann Laboratory, Department of Vegetable Crops University of California, Davis, CA. EEUU. Disponible en internet en: <http://www.ba.ars.usda.gov/hb66/019respiration.pdf>. [Consulta: 12 de noviembre de 2012].
- Segatori A, Di Masi S, y Gomila, T. (2005). Daño mecánico por golpe en manzanas. Informe proyecto Nacional N° 52-535.INTA Estación Experimental del Alto Valle del Río Negro, Argentina. 16 p
- Shaw G. and Burke H. (2003). Spectral imaging for remote sensing. Lincoln Laboratory Journal, 14(1):3–28.

- Thompson A.K. (1998). Tecnología post-cosecha de frutas y hortalizas. Natural Resources Institute (NRI), Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA): Department for International Development (DFID) 262 p
- Thompson J.F. (2007). Sistemas de cosecha en Tecnología Poscosecha de Productos Hortofrutícolas. 3ª edición. Kader, A. (Eds.). University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, Oakland, California, USA. pp. 73-76.
- Timoshenko S, y Goodier J. (1951). Teoría de la elasticidad. Ed. McGraw-Hill, N.Y. 567 p
- Upchurch B. L, Throop J. A, Aneshansley D.J. (1994). Influence of time, bruise-type, and severity on near-infrared reflectance from apple surfaces for automatic bruise detection. Transactions of the ASAE, 37 (5): 1571–1575
- Uritani I, and Asahi T. (1980). Respiration and related metabolic activity in wounded and infected tissue. In The Biochemistry of Plants, Vol. 2, D. D. Davis (Ed.). Academic Press, New York, Pp.: 463 – 485
- Vidal A, Talens P, Prats-Montalbán, JM, Cubero S, Albert F, and Blasco J (2012). In-line estimation of the standard colour index of citrus fruits using a computer vision system developed for a mobile platform. Food and Bioprocess Technology. 6(12): 3412-3419
- Vines H, Edwards G, and Griegson W. (1965). Citrus fruit respiration. Proceedings Florida State Horticultural Society, 78: 198 – 202
- Wang S, Huanh M, Zhu Q. (2012). Model fusion for prediction of apple firmness using hyperspectral scattering image. Computers and Electronics in Agriculture. 80: 1-7.
- Wills R, Lee T, McGlasson W, Hall E, y Graham D. (1984). Fisiología y Manipulación de Frutas y Hortalizas. Postrecolección. Ed. Acribia. 195 p
- Woodward J, and Topping A. (1972). The influence of controlled atmospheres on the respiration rates and storage behaviour of strawberry fruits. Journal of Horticultural Science, 47: 547 – 553
- Xiaobo Z, Jiewen Z, Xingyi H, Yanxiao L. (2005). Use of FT-NIR spectrometry in non-invasive measurements of soluble solid contents (SSC) of ‘Fuji’ apple based on different PLS models. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 87: 43–51

- Xing J, Bravo C, Jancsó P, Ramon H, and Baerdemacker J. (2005). Detecting bruises on 'golden delicious' apples using hyperspectral imaging with multiple wavebands. *Biosystems Engineering*, 90(1):27.
- Xing J, De Baerdemaeker J. (2005). Bruise detection on 'Jonagold' apples using hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology*. 37:152–162
- Xing J, De Baerdemaeker J. (2007). Fresh bruise detection by predicting softening index of apple tissue using VIS/NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology* 45: 176–183
- Xing J, Saeys W, and De Baerdemaeker J. (2007). Combination of chemometric tools and image processing for bruise detection on apples. *Computers and Electronics in Agriculture*, 56(1), 1-13.
- Yang C, Prasher S, Whalen J, and Goel P. (2002). Use of hyperspectral imagery for identification of different fertilization methods with decision-tree technology. *Biosystems Engineering*, 83(3):291-298.
- Zapater Z.I. (2007). Geografía del Bajo Cinca. Departamento de política e interior. Colección Comarca del Bajo Cinca capitulo I. El territorio. Disponible en internet en: [http://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/Departamentos/PoliticaTerritorialJusticiaInterior/Documentos/docs/Areas/Informaci%C3%B3n%20territorial/Publicaciones/Coleccion\\_Territorio/Comarca\\_Bajo\\_Cinca/17\\_40.pdf](http://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/Departamentos/PoliticaTerritorialJusticiaInterior/Documentos/docs/Areas/Informaci%C3%B3n%20territorial/Publicaciones/Coleccion_Territorio/Comarca_Bajo_Cinca/17_40.pdf) [Consulta: 9 de noviembre de 2013].



# Anexos

## A. Determinación de la fuerza de impacto

El impacto de la masa pendular utilizada sobre la fruta puede modelarse como el impacto de una esfera rígida sobre una esfera elástica. En este tipo de impacto, la respuesta dinámica al impactante es función de las masas, módulo de elasticidad, relación de Poisson, radio de curvaturas y la velocidad de aproximación relativa entre los dos objetos.

En base al análisis teórico de Timoshenko y Goodier (1951) sobre dos esferas impactando, la magnitud de la fuerza máxima,  $F(N)$ , actuando sobre ambos cuerpos puede ser expresada según la siguiente ecuación:

$$F = \left( \frac{4}{5} \times \frac{v^2}{n_1} \right)^{\frac{3}{5}} \times n^{\frac{2}{5}} \quad \text{Ec. A.1}$$

Dónde:

$v$ : velocidad relativa de aproximación de las esferas ( $\text{m s}^{-1}$ ).

$n_1$ : relación de las masas de choque (Ec. A.2).

$$n_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1 \times m_2} \quad \text{Ec. A.2}$$

Dónde:

$m_1$ : masa del impactante (kg).

$m_2$ : masa de la fruta (kg).

Como en nuestro caso la manzana se encuentra fijada a la base del sistema, la masa impactante le transmite toda su energía y por ello se puede considerar como un cuerpo de masa infinita. Por tanto, la relación de masas de choque vendría dada por la ecuación A.3:

$$n_1 \cong \frac{1}{m_1} \quad \text{Ec. A.3}$$

Dónde:

$n$ : es una función dependiente del radio del impactante ( $R_1$  en m), radio de curvatura de la fruta ( $R_2$ , en m).

$\mu$ : relación de Poisson ( $\mu$ ).

$E$ : módulo de elasticidad de la fruta.

$$n = \frac{4}{3} \times \frac{E}{1-\mu^2} \times \left[ \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \right]^{1/2} \quad \text{Ec. A.4}$$

La velocidad relativa de aproximación de las esferas puede calcularse efectuando un balance de energía en el sistema. Así, la energía de la masa impactante antes de soltar el péndulo es de tipo potencial, transformándose en energía cinética en el momento del impacto (Ec. A.5):

$$m_1 \times g \times h = \frac{1}{2} \times m_1 \times v^2 \quad \text{Ec. A.5}$$

La velocidad relativa de aproximación  $v$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) queda en función de la altura de la masa impactante  $h$ :

$$v = \sqrt{2 \times g \times h} \quad \text{Ec. A.6}$$

Dónde:

$v$ : velocidad relativa de aproximación ( $\text{m s}^{-1}$ ).

$h$ : altura de la masa impactante (m).

$g$ : gravedad 9,81 ( $\text{m s}^{-2}$ ).

La altura de la masa impactante  $h$  puede calcularse en función del ángulo de impacto  $\alpha$  y el radio de giro  $R_G$  del péndulo. La figura A-1 muestra el esquema de

$$h = R_G - R_G \times \cos \alpha$$

E.c. A.7

Dónde:

$R_G$ : altura de la masa impactante (m).

$\alpha$ : ángulo de impacto en grados.

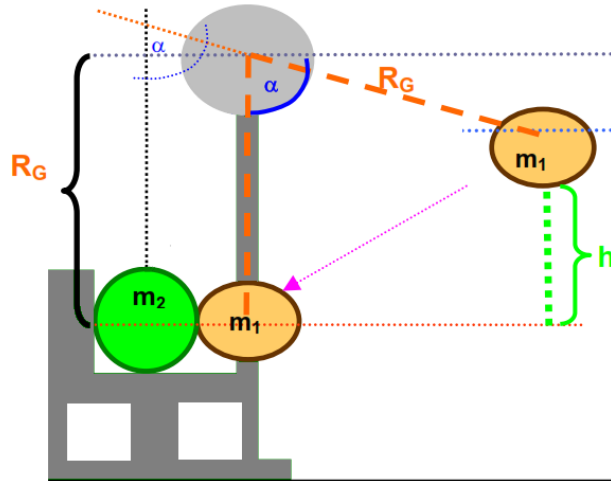


Figura A-1. Variables a considerar en el péndulo.

Sustituyendo  $h$  en la Ec. A.6, se puede calcular la velocidad relativa de aproximación de las esferas conocido el ángulo de impacto (Ec. A.8):

$$v = \sqrt{2 \times g \times R_G \times (1 - \cos \alpha)}$$

Ec. A.8

Una vez se obtiene la velocidad correspondiente a un ángulo de impacto aplicado a las frutas, se puede calcular la fuerza de impacto correspondiente, considerando los siguientes datos:

Características del sistema pendular:

- Masa del impactante ( $m_1$ ): 0,207 kg (207 g)
- Radio de curvatura de la masa impactante ( $R_1$ ): 0,025 m (2,5 cm)
- Radio de giro ( $R_G$ ): 0,3 m (30 cm)

Características intrínsecas a la fruta (Chen y Ruiz-Altisent, 1993):

- Módulo de Poisson ( $\mu$ ): 0,49
- Módulo de elasticidad ( $E$ ): 7,0 MPa

Características de las Manzanas Fuji empleadas en el ensayo:

- Promedio de la Masa de las frutas impactadas ( $m_2$ ): 0,231 kg (231 g)
- Promedio del Radio de curvatura de las frutas impactadas ( $R_2$ ): 0,035 m

Con los datos anteriores y para un ángulo de  $90^\circ$  la fuerza de impacto calculada fue de 1,507 N.



## B. Proceso de recolección y transporte de la manzana 'Fuji'

Durante la visita de campo se identificaron los diferentes procesos de la poscosecha de la manzana 'Fuji'.

### ➤ Proceso de la recolección

La recolección se realiza a mano, halando la manzana del árbol de tal forma que el pedúnculo se desprende sin ocasionar daños a la fruta. Esta labor se efectúa con el mayor cuidado posible, evitando en todo momento los golpes entre las frutas.

Dependiendo el grado de tecnificación de la plantación, unos recolectores utilizan unas bolsas tipo canguro (*picking bag*) como las mostradas en la figura B-1, que llevan en la parte frontal de su cuerpo como si fueran bolsos tipo manos libres. Las plantaciones menos tecnificadas emplean baldes plásticos donde depositan las frutas una a una hasta llenar el recipiente como se ilustra en la figura B-2. Los frutos se recolectan secos, sin gotas de lluvia o de rocío y sin ninguna presencia de agua en la superficie del fruto. En ocasiones se retrasa la recolección hasta que el viento y el sol sequen el agua presente.



Figura B-1. Recolección manual en bolsas tipo canguro (*picking bag*).



Figura B-2. Recolección manual en baldes plásticos.

Para garantizar la calidad de la cosecha, los recolectores deben cumplir una serie de normas:

- Nunca deben recoger frutos a tirón o recogerlos del suelo.
- No recoger frutos con muestras evidentes de ataques de insectos.
- No recoger frutos podridos, ya que son fuente de contaminación de los frutos sanos.
- No recoger frutos con defectos visibles.
- No recoger frutos demasiado pequeños, fuera de los calibres comerciales.
- Tener las uñas de las manos cortas para evitar las heridas al fruto.
- Los recipientes de recolección deben estar limpios y sin ningún filo o punta que ocasione un daño al fruto, además deben proteger los fondos, los laterales y la parte superior de los mismos.
- Al depositar la fruta en cajas o palots, esta no debe sobrepasar la altura del propio recipiente, es decir que debe quedar mínimo 15 cm de borde libre.

➤ **Proceso de Transporte de las frutas desde el árbol hasta el camión**

El proceso de transporte de las frutas desde el árbol hasta el camión depende del grado de tecnificación de la plantación. Generalmente se realiza de manera manual ya que los tamaños de las explotaciones se prestan para esto, pero en ocasiones el tamaño del cultivo exige que se realice de manera mecánica.

Cuando el transporte se realiza de manera manual debe cumplir una serie de normas:

- Las cajas que transporten no deben estar excesivamente llenas, para evitar la caída de fruta al suelo.
- Las cajas deben depositarse sobre un palet o directamente sobre el camión, nunca en el suelo.
- La carga y descarga de la caja se debe hacer sin volcar la fruta del recipiente para evitar dañarla.

Cuando el transporte se realiza de manera mecánica, se emplea un palot para recoger la fruta, y se transporta por medio de un tractor (figura B-3) hasta el final del cultivo, donde espera el camión. La velocidad de desplazamiento del tractor debe ser la más baja posible para reducir las vibraciones de los frutos en las cajas, lo cual minimiza los roces entre ellos.



Figura B-3. Transporte de manzanas

➤ **Proceso de Transporte de los frutos desde el campo a la central de acopio.**

El transporte de los frutos desde el campo a la central de acopio se realiza en camiones que soportan más de 3,5 toneladas, estos camiones son seleccionados sobre todo por el tipo de suspensión que ayuda a la absorción de energía provocada por los caminos o carreteras destapadas, además los transportistas debe vigilar su carga, con el fin de no aceptarla si no cumple con las siguientes características:

- Cajas o palots en las que la altura de la fruta sobrepasa la del propio envase, ya que al apilarlos, la fruta soporta el peso de los envases superiores.

- Camiones cargados de envases con fruta, con alturas superiores a los laterales del vehículo de transporte, sin la debida sujeción. Esta sujeción no debe hacerse sobre la propia fruta.

➤ **Proceso de Transporte de los frutos dentro de la central**

En el proceso de transporte dentro de la central de acopio se realizan diferentes operaciones que implican el movimiento de la fruta. En primer lugar se voltea la fruta que llega en el camión y se deposita sobre una zona suficientemente protegida que evita los golpes entre los frutos y la máquina.

Posteriormente, se lleva la fruta a las estaciones de trabajo donde se realizan las operaciones de acondicionamiento a través de cintas transportadoras o rodillos (Figura B-4). Estos mecanismos de transporte presentan el problema de acumulación de la fruta, generando daños por roces excesivos. Se intenta minimizar estos daños aplicando una pequeña cantidad de silicona, hasta que las cintas se humedezcan con el trabajo diario y permitan el movimiento fácil ante la acumulación de fruta.



Figura B-4. Rodillos de transporte de manzanas en la central de acopio.

## **C. Descripción del software Fruitspectro**

He programado una aplicación para la adquisición de las imágenes hiperespectrales, ya que la cámara empleada para adquirir estas imágenes solo puede ser manejada con el programa proporcionado por el fabricante. Este programa no permite la personalización del equipo según las necesidades del experimento, por esta razón fue necesario desarrollar una aplicación específica que permite controlar la cámara CoolSnap y los filtros sintonizables de cristal líquido (LCTF).

La aplicación Fruitspectro la he programado en lenguaje C++, utilizando las librerías de programación proporcionadas por el fabricante del equipo utilizado. Se utilizó las librerías en los casos en que era necesario establecer comunicación con los diferentes dispositivos, concretamente con la tarjeta de adquisición de imágenes, la cámara y los filtros. La plataforma de desarrollo que he utilizado para la aplicación es el programa comercial Microsoft Visual Studio 2009 (Microsoft Inc, EE.UU).

La aplicación funciona de un modo robusto frente a posibles errores que pudieran obtenerse, tanto por problemas de hardware, como por errores de usuario, y ofrece una interfaz sencilla, amigable e intuitiva. Todos los parámetros introducidos por el usuario se almacenan en un fichero de configuración para facilitar posteriores usos de la aplicación. El programa se contempla en cinco funciones básicas:

- Ver en vivo
- Barrido Visible
- Barrido Infrarrojo
- Calibracion
- ROI (Region Of Interest)

### ➤ **Ver en Vivo**

Esta función consiste en un hilo de ejecución o subproceso que permite visualizar la escena en tiempo real. Para utilizar esta función es necesario tener comunicación con la cámara, enviándole el tiempo de integración (tiempo de exposición durante el cual cada cuadro de la imagen es adquirido y que determina que la imagen sea más o menos clara) y la ROI de la imagen. Cuando se recibe la respuesta de la cámara se establece comunicación con el filtro seleccionado enviándole la longitud de onda en que se debe sintonizar. Al recibir la respuesta de que los filtros se encuentran sintonizados se procede a enviar una señal a la cámara para que adquiera las imágenes. Las imágenes se actualizarán en pantalla dependiendo del tiempo de integración fijado. Durante el funcionamiento de esta función, se puede modificar la ROI de dos formas posibles:

- ✓ Selección de ROI con el ratón: Se puede fijar la región de interés pulsando sobre el punto inicial de la imagen, arrastrando el cursor y soltando en el punto final. Cuando la ROI seleccionada con el ratón es menor de un tamaño prefijado no se tendrá en cuenta.
- ✓ Selección de ROI con el Botón ROI: Se pueden introducir manualmente las coordenadas de inicio y fin de la ROI o borrar la ROI previa introduciendo los parámetros por defecto de la cámara que corresponden a la imagen completa.

### ➤ **Barrido Visible o Barrido Infrarrojo**

Estas funciones permiten realizar la adquisición de imágenes de un conjunto de longitudes de onda consecutivas empleando un filtro o los dos de manera secuencial. Tras activar el filtro con el cual se desea trabajar se muestran en pantalla los datos cargados desde el archivo de configuración. Además, se muestran las diferentes opciones que se pueden escoger en el modo de barrido:

- ✓ Banda Única: es una función que sólo adquiere una imagen en una longitud de onda seleccionada.
- ✓ Barrido secuencial: permite adquirir una serie de imágenes en diferentes longitudes de onda, desde una inicial a una final introducidas por el usuario.
- ✓ Tiempo de integración: es el tiempo de integración o adquisición durante el que se adquiere cada imagen, esto es, el tiempo durante el cual el sensor recibe información. Este tiempo será el mismo durante todo el barrido.
- ✓ Cargar archivo: es una función que permite cargar los tiempos de integración desde un archivo de configuración, que pueden ser específicos para cada una de las bandas a adquirir durante el barrido.

El archivo de configuración contiene los siguientes datos básicos necesarios para poner en marcha el programa:

#### [Filtros]

LongIniVis: Longitud de onda inicial del filtro visible.

LongFinVis: Longitud de onda final del filtro visible.

LongIniInf: Longitud de onda inicial del filtro infrarrojo.

LongFinInf: Longitud de onda final del filtro infrarrojo.

IncLong: Incremento del paso de la longitud de onda para los barridos.

IncLongCal: Incremento del paso de la longitud de onda para la calibración.

#### [Cámara]

Roi.x1: =0

Roi.x2:=1391

Roi.y1:=0

Roi.y2:=1039

#### [Tiempos]

TimeManual: Tiempo de integración fijo o manual.

TimeIniCal: Tiempo de integración inicial para la calibración.

TimeFinCal: Tiempo de integración final para la calibración.

IncTimeCal: Incremento del paso del tiempo de integración para la calibración.

NivelGris: Nivel de gris para la calibración.

[Array\_Banda-Tiempo]

B-T-V: Longitud de onda – tiempo de integración de la calibración – filtro visible.

B-T-I: Longitud de onda – tiempo de integración de la calibración – filtro infrarrojo.

[Directorio]

Carpeta: Ruta de la carpeta de trabajo.

### ➤ **Calibración**

La calibración consiste en la búsqueda del tiempo de integración mínimo en el cual se alcanza un nivel de reflectancia predeterminado. Se hace normalmente empleando una referencia blanca modelo ID CSTR-99-050.

Esto se realiza para corregir las diferencias de sensibilidad que presentan los dispositivos empleados (cámara, lente, filtros, lámparas de iluminación) a las diferentes regiones espectrales, de forma que el tiempo será mayor para aquellas longitudes menos sensibles y mayor para aquellas longitudes de onda en el que el equipo es más sensible. De esta forma, se logra capturar la reflectancia real del fruto con independencia del equipo empleado. Estableciendo un límite mediante la referencia blanca, se consigue además optimizar el rango dinámico del sistema, sin llegar a saturar las imágenes.

Las imágenes adquiridas en este subproceso son analizadas pixel a pixel calculando la media de los niveles de gris hasta alcanzar el valor de umbral predefinido, en este caso el 80% de la reflectancia total, esto es el nivel de reflectancia (nivel de gris) 204. Cuando se alcanza el nivel de reflectancia predefinido, se almacena en el archivo de calibración el tiempo de integración con el cual se ha adquirido esa imagen.

Esta información se puede utilizar para realizar los barridos en frecuencia que no se hagan con un tiempo de integración fijo o manual. Los parámetros necesarios para realizar la calibración son los siguientes:



- Tiempo Inicial: es el tiempo de integración inicial de la cámara, desde el que se iniciará la calibración.
- Tiempo máximo: es el tiempo de integración máximo de la cámara al que llegara si no se encuentra el nivel de gris deseado (por defecto 5000 ms).
- Incremento del tiempo: es la tasa de aumento del tiempo de integración de la cámara entre dos adquisiciones (por defecto 1 ms).
- Banda Inicial: es la longitud de onda inicial, desde donde comenzará la calibración.
- Banda Final: es la longitud de onda final, donde finalizará la calibración.
- Resolución: es el incremento en nm de una longitud de onda a otra usado para realizar el barrido
- Nivel de reflectancia: es el umbral de luz al que se tiene que llegar analizando los píxeles de la imagen.

Al variar el tiempo de integración de la cámara se influye directamente en la cantidad de luz que recibe el CCD y al capturar esta información con tiempos de integración bajos el sensor recibe poca luz por lo que la imagen será más oscura y el nivel de gris medio bajo.

A medida que se incrementa el tiempo de integración se recogerá más luz y la imagen será más clara acercándose a niveles de gris altos. El nivel de gris de un píxel negro tiene valor cero ya que representa la ausencia de luz, mientras que un máximo de 255 representa el blanco o presencia total de luz en el píxel.

#### ➤ **ROI (Region Of Interest)**

La ROI es la región de interés o zona de importancia de la imagen. En una imagen tenemos una o varias zonas que presentan información importante a analizar, y otras zonas que simplemente constituyen fondo de la imagen o ruido. Para optimizar la adquisición se puede seleccionar una zona de la imagen que puede llegar hasta un tamaño máximo de  $1392 \times 1040$  píxeles. Como ya se ha comentado anteriormente, hay dos formas de modificar la ROI.

Si se está ejecutando la función de visualización en vivo es posible la modificación de la ROI utilizando el ratón. También se puede hacer uso del botón ROI, introduciendo manualmente las coordenadas o restaurando sus valores por los establecidos por defecto.

## D. Descripción de la aplicación BWcorrection

La aplicación BWcorrection está programada en MatLab R2010b de la empresa MathWorks, la aplicación usa Interfaces Gráficas de Usuario GUI, que facilitan el manejo del usuario.

La aplicación ofrece una interfaz sencilla, amigable e intuitiva en todo momento. El usuario se encarga de seleccionar los archivos que utilizará y de seleccionar la región de interés para la corrección. El programa se encarga de corregir y guardar la nueva imagen. El programa se compone en seis funciones basicas:

- ✓ Cargar la imagen del blanco de referencia
- ✓ Cargar la imagen del negro de referencia
- ✓ Selección de ROIs (Region Of Interest)
- ✓ Cargar la imagen para corección
- ✓ Corrección de la imagen
- ✓ Guardado de la imagen corregida

### ➤ **Cargar la imagen del blanco de referencia.**

El programa da la opción de seleccionar el archivo donde se encuentra el hipercubo con la imagen de la referencia blanca ya sea en formato .bsq o .raw. Carga la imagen seleccionada y abre la opción de seleccionar la ROI para la corrección.

### ➤ **Cargar la imagen del negro de referencia**

Igualmente como en la referencia blanca, el programa da la opción de seleccionar el archivo donde se encuentra el hipercubo con la imagen de la referencia negra ya sea en formato .bsq o .raw. dependiendo del formato de archivo seleccionado en la referencia blanca, se carga la imagen seleccionada y abre la opción de seleccionar la ROI para la correccion.

➤ **Selección de ROIs (Region Of Interest)**

En una imagen tenemos una o varias zonas que presentan información importante a analizar, y otras zonas que simplemente constituyen fondo de la imagen o ruido. En las dos opciones anteriores es necesario seleccionar las ROI de las dos referencias, que serán las zonas donde se extraerán la información para aplicar la fórmula para la corrección.

➤ **Cargar la imagen para corrección**

Esta función permite cargar el hipercubo con la imagen que se desea corregir.

➤ **Corrección de la imagen**

La función para corregir la imagen, aplica el algoritmo de corrección empleado por Gómez-Sanchis (2009), la corrección se hace pixel por píxel de la imagen que se quiere corregir y se crea una imagen nueva corregida sin modificar la imagen original.

➤ **Guardado de la imagen corregida**

Para el guardado de la imagen corregida, se ha creado una función que dependiendo del formato de la imagen guarda la nueva imagen corregida con el mismo formato que trae la original, igualmente crea la cabecera de la imagen en el formato .hdr.

## **E. Descripción del programa etiquetador espectral**

Para crear el conjunto etiquetado de píxeles es necesario seleccionar de cada una de las imágenes la zona afectada por el golpe y la zona sana. Esto implica abrir cada imagen y seleccionar los píxeles necesarios de cada clase, el tiempo empleado en esta operación depende de la cantidad de imágenes que se quieran etiquetar, pero por lo general, este proceso conlleva mucho esfuerzo y tiempo, además, no existe otra forma de etiquetar donde el usuario pueda ver la zona afectada y la zona sana y seleccionarlas al mismo tiempo.

Por esta razón se programó la aplicación Etiquetador Espectral que fue ensamblada en el programa MatLab, R2010b de la empresa MathWorks. La aplicación usa Interfaces Gráficas de Usuario GUI, que facilitan el manejo del usuario. En la creación del conjunto etiquetado de píxeles es necesario seleccionar manualmente la zona afectada por el golpe y la zona sana o sin golpes de la manzana, y guardar la información de cada selección para cada pixel con su respectiva etiqueta o clasificación (Sana o golpeada). El programa se compone en cinco funciones básicas:

- ✓ Cargar el hipercubo
- ✓ Ver imagen
- ✓ Selección de etiquetado
- ✓ Selección de ROIs (Region Of Interest)
- ✓ Guardado de la información del etiquetado

### **➤ Cargar el hipercubo**

Esta función abre un cuadro de dialogo de búsqueda que permite cargar el hipercubo el cual se desea etiquetar, aquí se puede seleccionar el tipo de formato del hipercubo .bsq o un .raw. Cuando se carga el hipercubo se muestra la información del tamaño (X, Y) y la cantidad de bandas del hipercubo.

➤ **Ver imagen**

Esta función permite cargar una imagen del hipercubo en la banda que el usuario desee, la banda o longitud de onda debe estar dentro del rango de las bandas mostradas cuando se carga el hipercubo. La imagen de la longitud de onda que se desee ver debe mostrar el contraste entre una zona sana y una zona golpeada, para que permita el mejor etiquetado.

➤ **Selección de etiquetado**

El programa permite seleccionar la etiqueta a través de un radio button, se puede escoger la etiqueta piel sana que tendrá un color verde en la ROI o la etiqueta de piel con golpe que tendrá un color rojo.

➤ **Selección de ROIs de etiquetado**

Después de escoger el tipo de etiqueta (sana o con golpe) se procede a seleccionar la región de interés o zona de importancia de la imagen, es decir se marca a través de clic la zona de interés y esta se marcará en un rectángulo dependiendo su tipo, en rojo para piel con golpe y en verde para piel sana.

➤ **Guardado de la información del etiquetado**

Después de etiquetar con las ROI las zonas de interés, el programa tiene una función que guarda la información etiquetada en una matriz que tiene los siguientes datos:

- ✓ Posición del pixel en X
- ✓ Posición del pixel en Y
- ✓ Banda del espectro
- ✓ Valor del pixel etiquetado
- ✓ Valor de la etiqueta (1 para piel sana, 0 para piel con golpe).
- ✓ Tamaño de la ROI.

La matriz se guarda en el formato .mat que es el formato de archivos de MatLab, esta información se podrá procesar posteriormente ya sea en MatLab o cualquier otro programa, ya que es fácilmente exportable a Excel.

## **F. Características edafo-climáticas de la zona de Osso de Cinca**

Osso de Cinca es un municipio español perteneciente a la Provincia de Huesca y la comarca Bajo Cinca, en la comunidad autónoma de Aragón. Se extiende en el margen izquierdo del río Cinca, en el valle formado por los montes denominados de la Encomienda y Calavera, a continuación se describe las características edafo-climáticas:

### **➤ Suelo**

Como consecuencia de su evolución geológica, la litología de la comarca del Bajo Cinca, el municipio de Osso de Cinca está constituida fundamentalmente por arcillas, margas, yesos, depósitos de glaciares y terrazas; en algunos lugares existen zonas coronadas por un casquete de rocas calizas. Sobre cada una de estas clases de materiales se desarrollan suelos cuyo valor agrario difiere mucho de unos lugares a otros (Zapater, 2007).

### **➤ Clima**

La zona se caracteriza por tener un clima continental árido con veranos muy secos y calurosos. Los inviernos predominan las heladas y las temperaturas bajas, aparecen anticiclones térmicos que dan a la región un tiempo seco y frío, en esta situación son frecuentes las nieblas en la localidad.

Según Ascaso y Liso, (1986), citado por Zapater (2007), en la clasificación de Thornwaite sería Mesotérmico I por las temperaturas y Árido D por su humedad. En los índices de Thornwaite, de De Martonne y de Dantin y Revenga, Fraga queda incluida en los climas propios de zonas áridas o semiáridas.

### ➤ **Temperatura**

Sus tierras se encuentran entre las isotermas de los 14-15 grados y su carácter se manifiesta en: temperaturas bajas en invierno, temperaturas elevadas en verano (las mayores de la Península Ibérica si exceptuamos la cuenca del Guadalquivir), oscilación térmica que supera los 20 °C.

El verano es cálido y continuado. Cuatro meses: junio, julio, agosto y septiembre sobrepasan los 20 °C de temperatura media y el número de días con 30 °C en la comarca es de 65 (Frutos, 1987 citado por Zapater (2007)). Durante los meses de julio y agosto es frecuente que las temperaturas medias diarias superen los 30 °C. En algunas ocasiones el termómetro marca temperaturas que adquieren caracteres abrasadores, alrededor de los 40 °C.

El invierno es frío y de larga duración. Las temperaturas medias de enero son siempre inferiores a 5 °C. Ligeramente más suaves aunque fríos igualmente se mantienen diciembre (5,7 °C de temperatura media) y febrero (6,7 °C). Incluyendo noviembre (9,5 °C) y marzo (10,5 °C), tenemos, por lo tanto, 5 meses con temperaturas medias inferiores o iguales a 10 °C.

Por otro lado, el número de días con 0 °C es, aproximadamente, de 20, y en ocasiones se producen oleadas de aire frío que provocan descensos termométricos muy por debajo de los 0 °C. Entonces se alcanzan con frecuencia mínimas absolutas de -5 °C, algunas veces -10 °C y, en ocasiones extremas, hasta -15 °C.

La oscilación térmica, el contraste entre la temperatura media del mes más cálido (julio con 24,8 °C) y la temperatura media del mes más frío (enero con 4,5 °), es elevada, pues supera los 20 °C y subraya otra nota de la continentalidad del clima.



➤ **Humedad relativa.**

En verano el calor estival sofocante que se une a la escasez de precipitaciones y a la falta de humedad atmosférica en un 27% promedio. En invierno se producen pantanos barométricos de aire frío y períodos de cierzo, frío y seco, no mayores a 63,7 % que sopla con frecuencia.

➤ **Radiación Solar.**

En la zona de Osso de Cinca se presenta insolación fuerte y constante (unas 3.000 horas anuales), calor estival sofocante que se une a la escasez de precipitaciones y a la falta de humedad atmosférica (Zapater, 2007).

➤ **Precipitación**

La precipitación esta entre 300 a 400 mm anuales, con una media de 348 mm, distribuidos irregularmente en el periodo anual con máximos en otoño y primavera y por lo tanto con prolongados meses de sequía. La fuerte evapotranspiración de la zona provoca déficits hídricos en los cultivos y por lo tanto rentabilidades nulas en las zonas de secano donde existen además pocas alternativas de cultivos (Zapater, 2007).

➤ **Velocidad del viento<sup>1</sup>**

La velocidad del viento máxima promedio de la zona registrada esta alrededor de 49,9 km h<sup>-1</sup> y la máxima registrada en 83,7 km h<sup>-1</sup>.

---

<sup>1</sup> Velocidad del viento Tomado de: [http://80.34.35.85:8080/fraga\\_alcanales/thismonth.htm](http://80.34.35.85:8080/fraga_alcanales/thismonth.htm)